

MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO  
TÉRMICO PARA REDUCIR RECHAZOS DE PIÑÓN TRASERO EN LA  
EMPRESA INTEGRANDO LTDA. – PEREIRA

CAMILO GOMEZ LLANO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PEREIRA

2016

MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO  
TÉRMICO PARA REDUCIR RECHAZOS DE PIÑON TRASERO EN LA  
EMPRESA INTEGRANDO LTDA. – PEREIRA

CAMILO GOMEZ LLANO

PROYECTO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR

ING MSC PEDRO DANIEL MEDINA VARELA

DOCENTE ASISTENTE

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PEREIRA

2016

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira, Risaralda noviembre 2016

Le dedico este título a mi familia por su apoyo incondicional a pesar de las adversidades, que siempre me impregnaron el sentido de perseverancia para alcanzar los objetivos y que los obstáculos deben ser superados.

Al ingeniero Pedro Daniel Medina agradezco por estar siempre predispuesto a guiar mi trabajo de grado; por sus asesorías gracias a su vasta experiencia en el tema de estudio y al suministro de información bastante valiosa para poder llevar a cabo la investigación.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION .....	19
1. OBJETIVOS .....	22
1.1 General.....	22
1.2 Específicos .....	22
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA.....	23
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	28
3. JUSTIFICACIÓN .....	29
3.1 Mercado Colombiano e Internacional .....	30
4. MARCO TEORICO.....	33
4.1 Planificación del experimento.....	36
4.2 Cribado.....	39
4.3 Estudio de los factores .....	40
4.4 Optimización.....	40
4.5 Estudio de mezclas .....	41
4.6 Realización de la experimentación .....	41
4.7 Interpretar los resultados.....	41
4.8 Aplicaciones del diseño experimental en la metalurgia .....	42
4.9 Aplicación de los diseños factoriales en el procesamiento de minerales .....	42
4.10 Pruebas metalúrgicas con diseño factorial .....	43
4.11 Primera etapa de selección de variables.....	44
5. METODOLOGÍA.....	46

5.1 DESCRIPCION DE ACTIVIDADES.....	47
6. DISENO DE EXPERIMENTOS (DOE) EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION .....	48
6.1 DIAGNOSTICO ESTADO ACTUAL .....	48
6.1.1 Condiciones de calidad de la dureza .....	48
6.1.2 Parametrizacion de las variables que intervienen en el proceso de tratamiento térmico .....	50
6.1.3 Proceso de tratamiento térmico por inducción .....	51
6.2 ELECCION DE LOS FACTORES, NIVELES Y RANGOS DEL DISENO DE EXPERIMENTOS EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO .....	58
6.2.1 FACTORES DEL DISENO DE EXPERIMENTOS .....	58
6.2.2 Factor potencia bobina de inducción .....	59
6.2.3 Factor tiempo de exposición al campo magnético .....	60
6.2.4 Factor Grados Brix liquido de enfriamiento.....	61
6.2.5 Factor temperatura liquido de enfriamiento .....	62
6.2.6 Factor presión flautas de tanque de líquido de enfriamiento .....	63
6.2.7 Factor diámetro de piñón trasero .....	64
6.2.8 Factor tipo de agujero de alivio de piñón trasero .....	64
6.2.9 Factor turno de trabajo.....	65
6.3 Variable de respuesta del diseño de experimentos en proceso de tratamiento térmico por inducción .....	66
6.4 ELECCION DEL DISENO DE EXPERIMENTOS PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION .....	68
6.4.1 Fase de detección .....	68
6.4.2 Selección resolución del experimento.....	69
6.4.3 Selección de réplicas para diseño de experimentos DOE .....	71

6.4.4 Selección del modelo de factorial fraccionado .....	71
6.5 Diseño factorial en Minitab para modelo seleccionado .....	72
6.5.1 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE .....	76
6.5.2 Aplicación del DOE en proceso de tratamiento térmico por inducción...	79
6.6 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION .....	84
6.6.1 Análisis de pareto de efectos para <i>DUREZA ROCKWELL C (HRC)</i> .....	85
6.6.2 Principio de confusión del modelo .....	87
6.6.3 Análisis de efectos principales para <i>DUREZA ROCKWELL C (HRC)</i> ...	89
6.7 Interacciones de factores para variable de respuesta <i>DUREZA ROCKWELL C</i> .....	93
6.8 ANOVA para efectos principales que inciden en la <i>DUREZA ROCKWELL C</i> .....	94
6.8.1 Análisis bloques y puntos centrales del modelo factorial fraccionado para <i>DUREZA ROCKWELL C</i> .....	96
6.9 Coeficientes del diseño factorial fraccionado .....	97
6.10 Análisis de residuales del DOE .....	98
6.11 Probabilidad normal de los residuales.....	99
6.11.1 Comprobación estadística de prueba de normalidad de Anderson Darling .....	100
6.12 Igualdad de varianzas .....	101
6.12.1 Residuales vs. Cada “valor de dureza” ajustado .....	101
6.12.2 Residuales vs. Cada predictor “factores seleccionados” .....	102
6.12.3 Comprobación estadística de varianzas iguales de modelo fraccionado .....	104
6.13 Independencia de errores.....	107

6.14 Fase caracterización .....	108
6.14.1 Full factorial .....	108
6.14.2 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE de FULL FACTORIAL.....	109
6.14.3 Modelo full factorial de diseño de experimento DOE .....	111
6.14.4 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION (FULL FACTORIAL).....	114
6.14.5 Análisis de Pareto de efectos de full factorial para <i>DUREZA ROCKWELL C (HRC)</i> .....	115
6.14.6 Análisis de efectos principales modelo full factorial para <i>DUREZA ROCKWELL C (HRC)</i> .....	116
6.14.7 Interacciones de factores en full factorial para variable de respuesta <i>DUREZA ROCKWELL C</i> .....	117
6.14.7 ANOVA para efectos principales en modelo Full factorial que inciden en la <i>DUREZA ROCKWELL C</i> .....	118
6.14.8 Coeficientes del diseño full factorial.....	120
6.14.9 Análisis de residuales del DOE FULL FACTORIAL .....	121
6.14.10 Independencia de errores .....	129
6.15 Fase de optimización.....	130
6.15.1 Superficie de respuesta .....	130
6.15.2 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE (superficie de respuesta) .....	131
6.15.3 Aplicación del DOE en proceso de tratamiento térmico por inducción .....	132
6.15.4 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION (SUPERFICIE DE RESPUESTA).....	134
6.15.5 Coeficientes del modelo central compuesto (superficie de respuesta) .....	138



6.15.6	Análisis de residuales del DOE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	139
6.15.7	Optimización de modelo de superficie de respuesta para la <i>DUREZA</i> .....	146
7.	CONCLUSIONES .....	151
7.1	Análisis comparativo defecto de fisurado año 2015 y año 2016.....	152
8.	RECOMENDACIONES.....	156
9.	BIBLIOGRAFIA.....	157
10.	WEBGRAFIA.....	158

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Defectos generados año 2014 líneas de producción de piñón delantero y trasero.....	24
Tabla 2. Defectos generados año 2015 líneas de producción de piñón delantero y trasero.....	26
Tabla 3. Lista de corridas (muestras en proceso de tratamiento térmico) según software Minitab.....	72
Tabla 4. Planeación para la fabricación de las muestras para el diseño de experimentos DOE.....	76
Tabla 5. Planeación y programación de las muestras para el diseño de experimentos DOE.....	77
Tabla 6. Listado de corridas con su respectiva toma de dureza y temperatura del diseño de experimentos en proceso de tratamiento térmico.....	80
Tabla 7. Listado de corridas según Minitab para diseño full factorial.....	109
Tabla 8. Planeación de la producción de las muestras para diseño de experimentos full factorial. ....	110
Tabla 9. Programación de la producción de las muestras para la aplicación del full factorial en proceso de tratamiento térmico .....	111
Tabla 10. Listado de corridas con valor arrojado de dureza luego de aplicación de full factorial en proceso de tratamiento térmico .....	113
Tabla 11. Listado de corridas según Minitab para full factorial .....	130
Tabla 12. Planeación de las muestras para diseño de experimentos full factorial .....	131
Tabla 13. Programación de las muestras para diseño full factorial.....	132
Tabla 14. Listado de corridas con su respectiva dureza luego de aplicación de diseño full factorial en proceso de tratamiento térmico. ....	133
Tabla 15. Comportamiento de defecto de fisura en línea de producción de piñón trasero año 2016.....	151

Tabla 16. Análisis comparativo entre año 2015 y 2016 de defecto de fisura en línea de producción de piñón trasero.....153

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Unidades defectuosas de piñón trasero por proceso año 2014.....	25
Figura 2. Unidades defectuosas de piñón trasero por proceso año 2015.....	27
Figura 3. Ciclo PHVA del diseño de experimentos .....	37
Figura 4. Plano y medidas geométricas de un piñón trasero. ....	49
Figura 5. Toma de temperatura en proceso de tratamiento térmico de piñón trasero.....	50
Figura 6. Maquina de calentamiento por inducción para tratamiento térmico de piñones traseros. ....	52
Figura 7. Bobinas de máquina de calentamiento por inducción.....	53
Figura 8. Tanque de enfriamiento de máquina de tratamiento térmico.....	54
Figura 9. Dispositivo para el análisis de más muestras del líquido de enfriamiento de máquina para tratamiento térmico. ....	55
Figura 10. Centro de control de potencia de bobina de máquina de tratamiento térmico. ....	56
Figura 11. Control de mando para variable tiempo de exposición de máquina de tratamiento térmico. ....	57
Figura 12. Planeacion del diseno de expermiento DOE en proceso de tratamiento termico. ....	59
Figura 13. Control de mando para factor potencia bobina en maquina de tratamiento termico. ....	60
Figura 14. Control de mando para factor tiempo de exposición de máquina para tratamiento térmico. ....	61
Figura 15. Dispositivo para analisis de liquido de enfriamiento de maquina de tratamiento termico. ....	62
Figura 16. Válvula de control de presión de flautas en maquina de tratamiento térmico. ....	63
Figura 17. Esquema de un piñón trasero de acero .....	64

Figura 18. Plano de piñón trasero ilustrando agujeros de alivio.....	65
Figura 19. Dispositivo para la toma de dureza Rockwell C. ....	67
Figura 20. Listado de resoluciones del diseño factorial en software Minitab. ....	70
Figura 21. Imagen de los piñones que se fabricaron para el experimento en proceso de tratamiento térmico.....	78
Figura 22. Toma de temperatura con dispositivo refractómetro.....	79
Figura 23. Grafica de cubos de diseño de experimentos en software Minitab para variable de respuesta DUREZA. ....	84
Figura 24. Grafica de pareto de efectos estandarizados en diseño de experimentos DOE. ....	86
Figura 25. Grafica de efectos principales de diseño de experimentos para variable de respuesta DUREZA. ....	88
Figura 26. Ilustración de la pendiente de la variable grados brix .....	89
Figura 27. Ilustración de la pendiente de la variable temperatura chiller. ....	89
Figura 28. Ilustración de la pendiente de la variable presión flauta. ....	90
Figura 29. Ilustración de la pendiente de la variable potencia bobina.....	90
Figura 30. Ilustración de la pendiente de la variable tiempo de exposición .....	91
Figura 31. Ilustración de la pendiente de la variable diámetro de piñón. ....	91
Figura 32. Ilustración de la pendiente de la variable tipo agujero de alivio .....	92
Figura 33. Gráfica de interacción para variable de respuesta DUREZA .....	93
Figura 34. Gráfica de prueba estadística de normalidad para residuales.Fuente. Software Minitab 15. ....	99
Figura 35. Prueba de normalidad de Anderson Darling .....	100
Figura 36. Grafica de residuales vs. Valor de dureza. ....	101
Figura 37. Grafica de residuales vs. Factores seleccionados en diseño de experimentos. ....	102
Figura 38. Grafica de residuales vs. Tiempo de exposición.....	103

Figura 39. Prueba de varianzas iguales.....	106
Figura 40. Grafica de residuales vs. Orden de corrida de diseño de experimentos. .....	107
Figura 41. Grafica de cubos de diseño full factorial para variable de respuesta dureza.....	114
Figura 42. Grafica de pareto de efectos estandarizados en diseño full factorial ..	115
Figura 43. Grafica de efectos principales para dureza.....	116
Figura 44. Gráfica de interacción para dureza en full factorial .....	117
Figura 45. Grafica de comprobación estadística de normalidad de residuales. ...	121
Figura 46. Grafica de probabilidad normal de residuales.....	122
Figura 47. Grafica de probabilidad de prueba de normalidad de Anderson Darling. .....	123
Figura 48. Grafica de residuales vs. Valor de dureza en full factorial .....	124
Figura 49. Grafica de residuos vs. Variable tipo agujero de alivio .....	125
Figura 50. Grafica residuales vs. Variable tiempo de exposición en full factorial.	126
Figura 51. Prueba de igualdad de varianzas en full factorial .....	128
Figura 52. Grafica de residuales vs. Orden de corrida en full factorial.....	129
Figura 53. Grafica de normalidad para diseño central compuesto.....	135
Figura 54. Gráfica de probabilidad de DUREZA en diseño central compuesto ...	139
Figura 55. Grafica de residuales vs. Valor de dureza en diseño central compuesto .....	140
Figura 56. Grafica de residuales vs. Variable tipo de agujero de alivio en diseño central compuesto.....	141
Figura 57. Grafica de residuales vs. Tiempo de exposición en diseño central compuesto .....	142
Figura 58. Prueba de igual de varianzas de tiempo de exposición para DUREZA .....	143

Figura 59. Prueba de igual de varianzas de tipo A.A. para DUREZA .....	144
Figura 60. Grafica de residuales vs. Orden de corrida en diseño central compuesto .....	146
Figura 61. Grafica de superficie de DUREZA vs Tipo A. A., Tiempo de exposición .....	147
Figura 62. Esquema de crecimiento de gráfica de contorno para variable de respuesta DUREZA .....	148
Figura 63. Grafica de contorno de DUREZA vs. Tipo A.A., Tiempo de exposición .....	149
Figura 64. Grafica piñones traseros fisurados en el año 2016.....	152
Figura 65. Grafica de análisis comparativo de fisura año 2015 y 2016.....	153

## GLOSARIO

CALOTA: Circunferencia de acero la cual tiene presentaciones diferentes en diámetro y espesor, esta es usada para la fabricación de piñones.

UEN: Siglas que denotan *unidad estratégica de negocio*.

PINON: Rueda de un mecanismo de cremallera.

PINON DELANTERO: Hace parte de la relación de transmisión de una motocicleta y la función de este es permitir el cambio de velocidad, este se ubica en la parte delantera de la motocicleta.

PINON TRASERO: Hace parte de la relación de transmisión de una motocicleta y la función de este es permitir el cambio de velocidad, este se ubica en la parte trasera de la motocicleta.

VARIOS: Hace referencia a piezas defectuosas las cuales tienen una ocurrencia baja de suceder y que son detectados para su posterior reparación.

FISURADO: Terminó que se le da a una pieza que tiene como defecto ruptura o cristalización del material y por ende es rechazada.

GENERADO: Proceso mediante el cual se generan los dientes de los piñones que engranan con la cadena y que internamente la empresa lo maneja como terminología para describir un defecto en el proceso de generación de dientes.

AGUJERO DE ALIVIO: Proceso mediante el cual se le quita peso al piñón trasero para que no afecte la funcionalidad del mismo.

LAMINA: Material usado para la fabricación de piñones de acero y la cual se consigue en el mercado en una presentación estándar en cuanto a sus dimensiones; este término es usado para definir un defecto que se presenta en las características fisicoquímicas del material.

ROSCADO: Proceso mediante el cual se fabrica la rosca de los agujeros de sujeción de los piñones y los cuales son necesarios para el ensamble en la motocicleta; este término describe un defecto ocasionado en el proceso de *roscado agujeros de sujeción*.

PERFORADO: Terminó que se le da al defecto presentado en el proceso de perforación de los agujeros de sujeción del piñón.



ESTRIA: Mecanizado que se realiza al piñón para que este ensamble con el eje estriado que tiene la motocicleta; este término hace alusión al defecto ocasionado en el proceso de estría agujero central.

SEIS SIGMA: Herramienta de mejoramiento continuo para la disminución de la variación en los procesos, eliminación de desperdicios, reducción de costos maximizando utilidades.

DMAIC: Definir, medir analizar, mejorar y controlar. La herramienta es una estrategia de calidad basada en estadística, que da mucha importancia a la recolección de información y a la veracidad de los datos como base de una mejora. Cada paso en la metodología se enfoca en obtener los mejores resultados posibles para minimizar la posibilidad de error.

VSM: Es una técnica gráfica que permite visualizar todo un proceso, permite detallar y entender completamente el flujo tanto de información como de materiales necesarios para que un producto o servicio llegue al cliente, con esta técnica se identifican las actividades que no agregan valor al proceso para posteriormente iniciar las actividades necesarias para eliminarlas, VSM es una de las técnicas más utilizadas para establecer planes de mejora siendo muy precisa debido a que enfoca las mejoras en el punto del proceso del cual se obtienen los mejores resultados.

## RESUMEN

En el sector de metalmecánica se está imponiendo la necesidad de tener procesos más eficientes, con cero defectos, a un costo bajo y unos tiempos oportunos de entrega. Es aquí donde radica la importancia de la investigación para la empresa Integrando LTDA., que en búsqueda de ser más competitiva y más eficiente en sus procesos, está apostando por el mejoramiento continuo de estos.

El trabajo permite visualizar el análisis estadístico de un diseño de experimentos de un proceso crítico y clave para la organización como es el tratamiento térmico usado en la fabricación de piñones; en el cual primero se tiene una etapa de detección del experimento donde es identificado el problema que se está presentando, cuales son los factores por los cuales se ocasiona el problema y en qué condiciones debe de encontrarse estos factores según la experiencia o las características técnicas del equipo, maquina o herramienta. Aquí es importante identificar los factores controlables y no controlables (factores de ruido) (Pérez, Metodología seis sigma a través de Excel, 2011); que inciden en el resultado del defecto que se presenta en las piezas; además se identifica la variable que se quiere impactar así como el tipo de diseño del experimento. La siguiente etapa es la de caracterización del experimento, en la cual por medio de una análisis estadístico de ANOVA y haciendo uso de la herramienta Minitab (software para análisis estadístico), se encontraron los factores que inciden significativamente en el resultado como lo es el defecto de fisurado, y estos son usados para estructurar y determinar los valores necesarios para la aplicación del diseño de experimentos escogido en la etapa anterior.

La tercera etapa es la de optimización del experimento donde se busca hallar aquellos valores que maximicen o minimicen la variable que se quiere impactar de acuerdo al objetivo o necesidad de la compañía, por ende es importante tener claro que busca; además se realizan conclusiones al respecto con el fin de determinar una ecuación que me explica el comportamiento según los valores que se le den a los factores que se seleccionaron por tener incidencia en el problema y cuáles son los valores más óptimos para obtener el máximo beneficio. Adicional a esto se reduce la variación del proceso y por ende el proceso es estable y se puede concluir estadísticamente que está bajo control.

## SUMMARY

In the metalworking sector it is imposing the need for more efficient processes, with zero defects, at a low cost and a timely delivery times. It is here where the importance of research for the company integrando LTDA. seeking to become more competitive and more efficient in their processes, is committed to the continuous improvement of these.

The work displays the statistical analysis of a design of experiments of a critical process and key to the organization as heat treatment is used in the manufacture of sprockets; in which first have a step of detecting the experiment where it is identified the problem that is occurring, what are the factors by which the problem is caused and under what conditions must would find these factors in the experience or the technical characteristics of equipment, machine or tool. This is important to identify the controllable and uncontrollable factors (noise) (Pérez, Six Sigma methodology through Excel, 2011); that affect the result of the defect that occurs in parts; plus the variable to impact the type and design of the experiment is identified. The next stage is the characterization of the experiment, in which through a statistical analysis of ANOVA and using the Minitab (software for statistical analysis) tool, factors that significantly affect the result as it is the defect found of fissured, and these are used to structure and determine the values necessary for the application of experimental design chosen in the previous step.

The third stage is the optimization of the experiment which seeks to find those values that maximize or minimize the variable to impact according to the purpose or need of the company, therefore it is important to understand that looking; further conclusions were made in order to determine an equation that explains my behavior according to the values to be given to factors that were selected have an impact on the problem and what are the most optimal settings are for maximum benefit. Additional to this process variation is reduced and thus the process is stable and it can be concluded that statistically is under control.

## INTRODUCCION

La presente investigación en la empresa Integrando LTDA., se refiere al tema de diseño de experimentos el cual hace parte de la metodología seis sigma que representa mejoramiento continuo y hace énfasis en la herramienta DMAIC. Esta herramienta de diseño de experimentos es de gran interés para la industria debido al impacto tan significativo que tiene sobre la calidad del producto, los tiempos de espera, tiempos de configuración de máquina y reducción de costos que finalmente se ven reflejados en una mayor rentabilidad.

La característica principal que tiene el diseño de experimentos es que estadísticamente se definen unos valores óptimos de los parámetros del proceso con el fin de obtener una mayor productividad, menor variación del proceso y por ende una mejor calidad a un costo razonable.

Para abordar el tema se hace necesario conocer de fondo la problemática que se está presentando, así como las causas por las cuales este se presenta; para la empresa Integrando LTDA., es muy importante el mejoramiento continuo reflejado en una mayor productividad y una alta calidad, por ende el diseño de experimentos hace parte de las herramientas con las cuales pretende dar solución al problema, que radica en la producción defectuosa que se genera en el proceso de tratamiento térmico, el cual tiene como particularidad que es un proceso realizado por tratamiento térmico de inducción, es decir, una bobina que genera un campo magnético el cual produce un efecto de calor sobre el acero dándole la dureza según necesidades del cliente o mercado.

Para integrando LTDA., la competitividad y productividad es un factor clave de éxito en el entorno en que se mueve, por ende busca siempre estar mejorando su procesos, para que sean más eficientes y que se refleje en los costos ofertando productos de alta calidad a un precio razonable, además valor agregado como disponibilidad, flexibilidad, versatilidad y oportunidad que genera diferenciación en el mercado y permite tener influencia en el poder de decisión del cliente cuando desea adquirir los productos. Por otra parte el interés de la compañía es poder sacar el máximo beneficio de la capacidad instalada de la planta de producción y colocar todos sus procesos productivos a punto, en especial aquellos que presentan afectan el flujo normal de la producción y que se desea tenerlo en condiciones estables para lograr los resultados esperados.

Además, las técnicas de mejoramiento continuo como son el diseño de experimentos permiten optimizar el uso del recurso dándole el mayor aprovechamiento y sacando las mayores ventajas de este de acuerdo a la necesidad. Esto se realiza por medio de un análisis estadístico de los factores que inciden en el problema y los niveles de estos, para obtener el máximo beneficio de

sus procesos. Cabe resaltar que para la academia no es un tema que pase desapercibido, ya que desde su contexto busca contribuir a la industria para que esta sea más competitiva y productiva en mercados tan dinámicos y en entornos tan complejos, y pueda mantenerse y proyectarse teniendo presente todo lo que lo rodea y como puede alinearlos a su estrategia corporativa.

En el ámbito profesional, el interés radica en conocer los fundamentos del diseño de experimentos, su aplicación y adaptación a la industria, así como el impacto que tiene sobre los costos de producción que se ven reflejados en una mayor contribución para los accionistas, y específicamente como contribuye a la estrategia corporativa de la compañía y a los logros de los objetivos planteados por esta.

En el marco de la teoría de diseño de experimentos, la investigación se realizó con una serie de ensayos en el proceso de tratamiento térmico de piñón trasero de la planta de producción. En dichos ensayos se recopilaban datos claves, los cuales son necesarios para poder realizar el análisis estadístico del diseño y poder determinar los valores óptimos que mejor beneficio generan en la variable que se pretende impactar (variable de respuesta). El diseño se caracterizó con el fin de determinar qué factores inciden significativamente y así poder establecer condiciones óptimas estadísticamente.

En la investigación uno de los obstáculos fue disponer de la máquina para poder realizar los ensayos, ya que esta hace parte del proceso productivo y por ende durante este tiempo se interrumpió el flujo en la línea de producción afectando el cumplimiento del indicador de productividad; sin embargo la compañía evaluó costo-beneficio optando por abrir el espacio y permitir realizar los ensayos para el diseño de experimentos y posterior optimización del proceso.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 General

Reducir el porcentaje de producto no conforme por fisurado de piñones traseros en Integrando LTDA de la ciudad de Pereira.

### 1.2 Específicos

- Diagnosticar el estado actual de la no conformidad de piñones traseros.
- Definir cuáles son las variables involucradas y cuáles son los niveles de estas que afectan la no conformidad de piñón trasero.
- Determinar el tipo de diseño experimental para las condiciones dadas en el estudio.
- Realizar fase experimental en proceso de tratamiento térmico planta de Integrando LTDA., y hacer análisis estadístico de los datos arrojados del experimento.
- Conclusiones y recomendaciones.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

En Integrando Ltda., una de sus UEN (unidad estratégica de negocio) más atractivas es la de piñonería, puesto que es la raíz del negocio y la que lo ha proyectado aún más en el mercado, adicional a esto el posicionamiento de su marca se debe al prestigio que ha adquirido el producto y que lo cataloga como uno de los mejores en el mercado por su calidad y durabilidad.

Garantizar cada una de las etapas de su proceso productivo para la elaboración de piñones en acero es clave puesto que de este depende su funcionalidad y desempeño en la motocicleta, así mismo como su durabilidad ya que en el kit de arrastre es donde se concentran los mayores esfuerzos mecánicos de la motocicleta siendo de vital importancia que esta pieza cumpla con la normatividad exigida. El rendimiento o desempeño en muchas ocasiones se ve afectado por no controlar variables críticas del proceso productivo que finalmente desencadena en que el piñón se desgaste o presente ruptura o en su defecto un sonido distorsionador en la relación de la motocicleta. En el proceso productivo para la fabricación de piñones traseros en acero es muy importante garantizar cada una de las etapas de este, cumpliendo a cabalidad con las especificaciones que exige la normatividad y que son de carácter internacional. Por ende en cada etapa se tienen sistemas de control los cuales permiten estar controlando las variables que pueden afectar para que el producto que los piñones en acero no cumplan con dichas especificaciones.

En Integrando Ltda. Se tienen claramente identificados cada uno de los defectos que pueden generarse durante el proceso productivo de piñones, tanto para el piñón delantero como para el piñón trasero, sin embargo hay variables más relevantes en uno que en el otro. A continuación un diagrama de pareto por línea de producto que permite visualizar los defectos generados por proceso y cual realmente es más relevante teniendo en cuenta que por medidas geométricas el piñón trasero representa más pérdida o desperdicio de material que en el caso de piñón delantero, siendo más atractiva para la compañía atacar esta línea de negocio dado que representa el 60% de la facturación de la compañía y ocupa el 70% de la capacidad disponible de la planta de producción lo que deduce que es de gran importancia para Integrando LTDA. Mejorar sus procesos productivos con el fin de ofertar productos de buena calidad a un costo razonable para el cliente siempre cumpliendo con la promesa convenida. Dado lo anterior el análisis se concentrará en la línea de producción de piñón trasero.

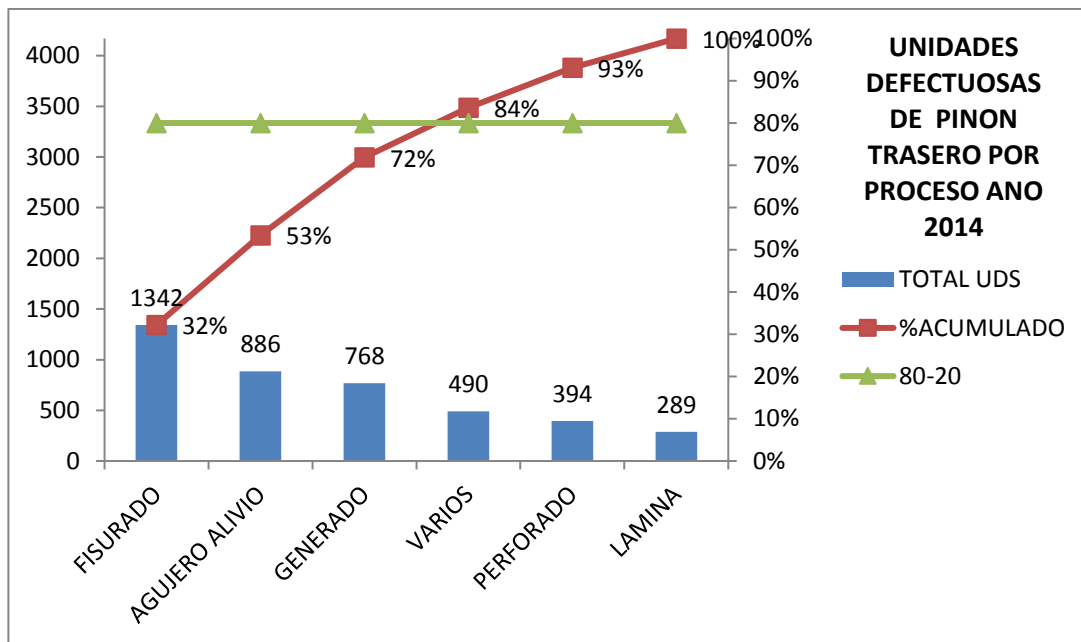
Tabla 1. Defectos generados año 2014 líneas de producción de piñón delantero y trasero.

DEFECTOS AÑO 2014							
PIÑÓN DELANTERO				PIÑÓN TRASERO			
PROC ESO	TO TAL UD S	% PARTICIP ACION	%ACUM ULADO	PROCES O	TO TAL UD S	% PARTICIP ACION	%ACUM ULADO
VARIOS	361	28%	28%	FISURAD O	134 2	32%	32%
GENER ADO	339	27%	55%	AGUJERO ALIVIO	886	21%	53%
LAMINA	285	22%	77%	GENERAD O	768	18%	72%
ROSCA DO	185	15%	92%	VARIOS	490	12%	84%
ESTRIA	55	4%	96%	PERFORA DO	394	9%	93%
PERFO RADO	47	4%	100%	LAMINA	289	7%	100%
<b>TOTAL PIÑÓN DELAN TERO</b>	<b>127 2</b>	<b>100%</b>		<b>TOTAL PIÑÓN TRASERO</b>	<b>416 9</b>	<b>100%</b>	

Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.



Figura 1. Unidades defectuosas de piñón trasero por proceso año 2014.



Fuente. Departamento calidad Integrando LTDA.

Para el año 2014 se observa que comparativamente el piñón trasero genera mayor número de unidades defectuosas que el piñón delantero, con un total de 4169 unidades contra 1272 unidades de piñón delantero, siendo la primera la línea de gran interés para la compañía puesto que en términos económicos es allí donde se están concentrando las mayores pérdidas ocasionando que no se cumpla con la rentabilidad esperada del negocio y mucho menos el aprovechamiento de la materia prima la cual debe de ser importada por sus características fisicoquímicas especiales.

Para el caso de piñón trasero el defecto más frecuente fue fisurado con una participación del 32% con 1342 unidades del total de los defectos generados, mientras que para el caso del piñón delantero uno de los defectos más frecuentes fue generado con una participación del 27% con 339 unidades del total de los defectos. Se observa en este caso que la línea de producción del piñón trasero generó más unidades defectuosas que la línea de piñón delantero, siendo el defecto más representativo el fisurado de piñón trasero con un total de 1342 unidades en comparación con el piñón delantero que sumando el total de unidades defectuosas en el año 2014 dan un valor de 1272 unidades, valor que está por debajo del número de unidades reportadas en el proceso más crítico de piñón trasero.

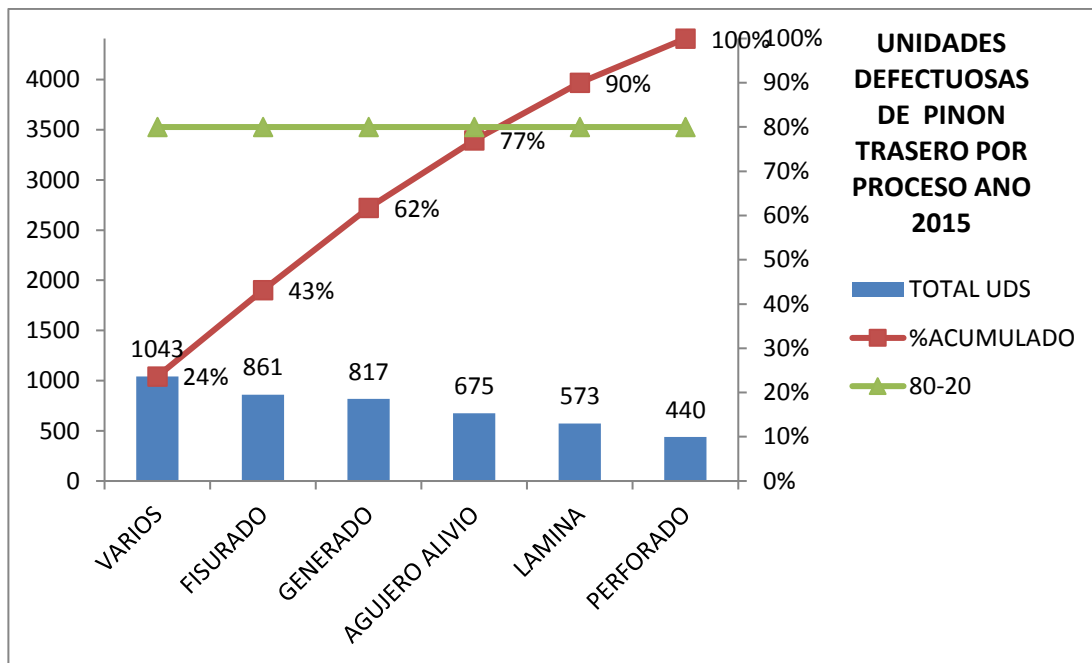
En el año 2015 el comportamiento de los defectos por línea de producción, piñón trasero, piñón delantero fue el siguiente.

Tabla 2. Defectos generados año 2015 líneas de producción de piñón delantero y trasero.

DEFECTOS AÑO 2015							
PIÑÓN DELANTERO				PIÑÓN TRASERO			
PROCESO	TOTAL UD S	% PARTICIPACION	%ACUMULADO	PROCESO	TOTAL UD S	% PARTICIPACION	%ACUMULADO
VARIOS	1280	41%	41%	VARIOS	1043	24%	24%
LAMINA	531	17%	59%	FISURADO	861	19%	43%
FISURADO	419	14%	72%	GENERADO	817	19%	62%
GENERADO	394	13%	85%	AGUJERO ALIVIO	675	15%	77%
ROSCADO	323	10%	95%	LAMINA	573	13%	90%
PERFORADO	139	5%	100%	PERFORADO	440	10%	100%
<b>TOTAL PIÑÓN DELANTERO</b>	<b>3086</b>	<b>100%</b>		<b>TOTAL PIÑÓN TRASERO</b>	<b>4409</b>	<b>100%</b>	

Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.

Figura 2. Unidades defectuosas de piñón trasero por proceso año 2015.



Fuente. Departamento calidad Integrando LTDA.

Para el año 2015 se observa que en el caso de piñón trasero el segundo defecto más frecuente fue fisurado con una participación del 20% con 861 unidades del total de los defectos generados, para el año 2015 nuevamente la línea de producción del piñón trasero generó más unidades defectuosas que la línea de piñón delantero, con un total de 4409 unidades contra 3086 unidades de piñón delantero.

El análisis del año 2014 y 2015 de las unidades defectuosas por UEN permite visualizar que el piñón trasero durante este periodo de tiempo presentó los defectos fisurado, agujero de alivio y generado los cuales representan el 80% de los problemas generados por calidad; mientras que el piñón delantero reflejó los defectos de lámina, fisurado y generado los cuales representan el 80% de los problemas generados por calidad. Dentro de estos defectos que se encuentran por línea lo que son agujero de alivio, generado y lamina son re-procesables pero representan un sobre costo en el producto; para el caso del defecto de fisurado es totalmente imposible recuperar el producto y debe de ser dado de baja y destruido.

Si se analiza por UEN, la línea de piñón trasero con respecto a la línea de piñón delantero, el piñón trasero geométricamente representa más área de consumo de materia prima, lo que ocasiona una pérdida económica bastante considerable teniendo en cuenta que la materia prima con la que se fabrican los piñones en acero es importada con un costo promedio de (\$18946 COP) por unidad de piñón y que teóricamente dentro de los costos de producción la materia prima representa el 60% de los costos totales; además la etapa del proceso en la cual se detecta el defecto tiene inmerso unos costos de etapas anteriores que deben de ser asumidos por la compañía cargándolos a otros productos; para el caso del piñón trasero diámetros que oscilan entre 100 mm a 280 mm, y el piñón delantero diámetros que oscilan entre 20 mm y 85 mm, siendo más representativo el costo de desecho asumido por la empresa de la línea de piñón trasero que la línea de piñón delantero impactando la rentabilidad de la compañía y por ende la retribución a sus accionistas. Por lo anterior, el estudio se enfoca en identificar las variables y sus valores óptimos para minimizar el defecto de fisurado en la elaboración de piñones traseros en acero.

## 2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se puede reducir el porcentaje de producto no conforme por fisurado de los piñones traseros en acero en Integrando Ltda.?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Integrando LTDA es una compañía que nació de la necesidad que se tenía de un proveedor nacional de kits de arrastres para las motocicletas, especializándose en la fabricación de piñones en acero; los cuales se componen de un piñón delantero y un piñón trasero, siendo esta línea de negocio los cimientos de la compañía contribuyendo con un 60% en la facturación mensual; la cual la ha proyectado de tal manera que su marca es reconocida por su calidad y durabilidad; con una producción promedio mensual de 91996 unidades, teniendo una participación de 55% de piñón trasero (50598 unidades) y piñón delantero de 45% (41398 unidades), además ocupa el 70% de la capacidad disponible de la planta de producción (Duque, 2016); siendo más relevante el piñón trasero que delantero . En dicha línea la compañía se vio en la obligación de estandarizar sus procesos e incluir tecnología de punta para así poder garantizar el proceso productivo de piñones y que estos cumplan con una normatividad, la cual es necesaria para la aprobación por parte de las diferentes ensambladoras de motocicletas del país.

Es aquí donde radica la importancia de garantizar cada una de las etapas del proceso productivo de piñones puesto que la calidad de los mismos es fundamental para su funcionalidad, por ende controlar esas variables de entrada de cada etapa del proceso es vital para que en la salida del mismo se refleje un resultado satisfactorio y este dentro de los rangos aprobados por la compañía. Cuando se habla de kits de arrastres de una motocicleta hace alusión a la relación de esta, donde se concentran los mayores esfuerzos mecánicos, por esto es tan importante que este producto en específico cumpla con la normatividad, generando un óptimo rendimiento de la motocicleta. En muchas ocasiones el rendimiento de la motocicleta se ve afectado directamente por un problema de calidad en el kit de arrastre que se transmite en una queja o reclamo por parte del cliente.

Los piñones trasero y delantero que componen el kit de arrastre son fabricados en acero 1045, materia prima que no es posible encontrar en las condiciones fisicoquímicas ideales en el país y por ende es necesaria que esta sea importada, siendo más representativa en el piñón trasero puesto que tiene un costo promedio de \$18946 COP por unidad de piñón, además lo que fue en el año 2014 generó 1342 unidades defectuosas (32%) por fisurado del total de unidades defectuosas reportadas en el año y para el año 2015 generó 861 unidades defectuosas (19%) por fisurado del total de unidades defectuosas reportadas en el año, teniendo la particularidad que el defecto de fisurado desde la perspectiva del departamento de calidad de Integrando LTDA. es imposible reprocesarse o recuperarse a diferencia de los demás defectos que se encuentran catalogados por la compañía, lo que actualmente está ocasionando pérdidas económicas para la compañía y que finalmente se está reflejando en una baja retribución para los accionistas.

Teniendo en cuenta esto la directriz por parte de los directivos de la compañía es del máximo aprovechamiento de la materia prima reduciendo significativamente los defectos y garantizando la repetibilidad y reproducibilidad en cada etapa del proceso productivo de piñones en acero, enfatizándose en la línea de piñón trasero, controlando aquellas variables de entrada de proceso para así garantizar su estabilidad que se verá reflejado en un producto que cumple con las especificaciones exigidas por el cliente.

Hoy en día los métodos estadísticos son fundamentales en la industria puesto que se utilizan en la resolución de problemas, en la planificación de la toma de datos, en el análisis de las relaciones entre variables y en la toma de decisiones. El Diseño de Experimentos es una herramienta estadística que permite planear una prueba o serie de pruebas para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca de los procesos, a partir del análisis de los datos recolectados; sobre todo en la metalurgia donde sus procesos son afectados significativamente por muchas variables que no permiten tener estabilidad de los mismos generando improductividad.

Adicional a esto se habla de un mercado poco atractivo para muchos debido a los costos de producción que a diferencia del mayor competidor que son los chinos, son bastante representativos y no permiten una libre competencia con estos, ocasionando que el producto sea más costoso sesgando al cliente ya que el poder de decisión en este caso se ve claramente afectado por el precio del producto.

En Colombia no es una excepción, como lo plantea Rojas, M. (2008), quien manifiesta lo siguiente:

### 3.1 Mercado Colombiano e Internacional

Son pocas las empresas nacionales que pueden fabricar piñones complejos, por eso casi siempre importan las piezas. Las importaciones hechas en los últimos años hablan de esta situación: del 2005 al 2006, la importación de bienes de capital representó un 62 por ciento del total efectuado por Colombia, mostrándose un incremento del 42 por ciento representado en máquinas y aparatos de oficina, herramientas, partes y accesorios de maquinaria industrial. En el 2007 siguió la tendencia con un crecimiento del 49,1 por ciento donde las mayores compras se hicieron en el grupo de calderas, máquinas y partes, representadas en 687 millones de dólares. Contrastando con esta situación, la academia colombiana, que acompaña a muchas pymes en su proceso de modernización, reporta una situación alentadora. Según el catedrático de la Universidad Nacional, Ernesto Córdoba: “Hoy, por ejemplo, tenemos una experiencia exitosa entre Industrias Ramfé, Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia, donde se ha logrado la conversión de máquinas medidoras de engranajes a tecnología CNC Código

110108- 12360. Lo que permite no solo la automatización del proceso de control de calidad dimensional, sino también la confirmación del grado de calidad de los engranajes hasta nivel DIN 5. Esto demuestra que hay que mirar desde todos los ámbitos hacia la autosuficiencia empresarial para llegar a mercados internacionales. Además es una prioridad la participación del estado con una política fuerte de apoyo a la investigación”. Por su parte, la producción de engranes por cadena, presenta una situación un poco distinta. Se ha logrado tener una calidad considerable que le permite a la industria colombiana llegar a mercados de Suramérica y Centro América. En este segmento de producción se puede generar un stock amplio ya que las características técnicas adaptadas a las normas internacionales son estándar, lo que de paso favorece la adecuación de las piezas para las distintas necesidades industriales. La única limitante está en la provisión existente en el país de algunos tipos de aceros importados para piezas específicas –que los productores dicen– no se consiguen en localmente. Pero el proceso de concientización y modernización de la industria ha permitido que se pueda producir piñones con una calidad de exportación. La piñonería como parte de la industria metalmecánica está en un punto intermedio, el alto grado de dificultad de maquinado encarece su fabricación, las pérdidas de potencia por fricción, elevadas temperaturas de servicio, bajo nivel de precisión por desgaste y exceso de ruido contaminante, hacen que pocas empresas se dediquen a elaborarlos. Sin embargo, estos mismos problemas se han convertido internacionalmente en generadores de soluciones. Las nuevas exigencias de diseño y precisión han resultado en desarrollos innovadores, más eficientes, con equipos electrónicos de velocidad controlados por software de control numérico (CNC). Es allí donde la industria nacional necesita superar las barreras, aprovechando las nuevas tecnologías y modernizarse para garantizar la posibilidad de incursionar de forma competitiva en la fabricación y comercialización de estos mecanismos, incluso apuntándole a los mercados internacionales<sup>1</sup>.

Para integrando LTDA., no es ajeno la dificultad de la fabricación de piñonería, sin embargo la trayectoria en el mercado le ha permitido generar como valor agregado intangible el conocimiento para diseñar y elaborar piñones complejos para el sector de motocicletas e industrial siendo una de las pocas empresas en el país dedicadas a esto. Como lo afirma Rojas, M (2008), la dificultad en la consecución de materiales óptimos para la fabricación de piñones y la alta precisión y exigencia de la normatividad hacen que este tipo de productos se sobrecoaste siendo poco atractivo para el mercado debido a sus altos costos reflejados en el precio final del producto, y dándole vía libre al mercado chino puesto que ofertan productos a un precio mucho más bajo a comparación del que puede ofertar las empresas

---

<sup>1</sup> Rojas, M. (2008, Agosto - Octubre). Piñones diente por diente y vuelta por vuelta. Revista Metal Actual, Edición 9, pp.44-50.

colombianas, restringiendo el acceso a este tipo de mercado y ocasionado que los pocas industrias que se dedican a este oficio decidan incursionar en otros mares. Sin embargo esas pocas compañías dedicadas a la elaboración de piñones por engranaje de cadena como lo es Integrando LTDA., deben de estar a la vanguardia de la tecnología, ya que es clave para una mayor productividad, para minimizar costos, y ofrecer productos a un costo razonable que finalmente se verá reflejado en una mayor utilidad.

Dentro de la planta de producción una de las tecnologías existentes es la del proceso de temple por inducción (campo magnético que genera calor al producto), el cual tiene unas características especiales que son atractivas para la compañía pero dada la complejidad del mismo, no se tienen claramente definidas las variables que afectan significativamente el proceso y que no permiten tener un proceso estadísticamente estable generando aquí una pérdida para la compañía y dándole más fuerza a la competencia para que con el rubro precio tenga una ventaja competitiva en el mercado la cual tiene un impacto bastante alto en el poder de decisión del cliente que finalmente pesa en la elección del producto que desea consumir; es aquí donde la compañía ha enfocado sus esfuerzos, tanto así que dentro de su planeación estratégica, su estrategia corporativa de mayor relevancia es la reducción de costos pues como meta se tiene una mayor participación en el mercado, que como lo afirma Duque, A. (2016) es tan solo de un 12%, siendo este un porcentaje muy bajo para la trayectoria de la compañía, y teniendo en cuenta el valor agregado de sus productos por durabilidad y funcionalidad, lo que preocupa a sus inversionistas que obliga a que estos tengan que enfatizar y orientar su cadena de valor hacia la reducción de costos para ser más competitivos en un mercado complejo y de pocas posibilidades para aquellas compañías que no tengan un desarrollo tecnológico interesante.



#### 4. MARCO TEORICO

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia; para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basaba en estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- \* Es necesario un gran número de pruebas.
- \* Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.
- \* No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- \* Es inviable, en muchos casos, por problemas de tiempo o costo.

Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, son más eficaces y proporcionan mejores resultados con un menor coste<sup>2</sup>. Es aquí donde radica la importancia de conocer estas variables de entrada que afectan directamente en la calidad del producto y no permiten tener un proceso controlado, teniendo en cuenta que en un sistema la salida es notoriamente afectada por aquellos factores influyentes en la entrada y que arroja como resultado pérdidas económicas para la compañía.

Las investigaciones y en particular los diseños experimentales intentan establecer básicamente relaciones causa-efecto. Más específicamente, cuando se desea estudiar como una variable independiente (causa) modifica una variable dependiente (efecto). Un ejemplo podría ser: analizar el efecto que un plan de entrenamiento basado en la técnica Facilitación Neuromuscular Propioceptiva (FNP) (variable independiente) produce sobre la movilidad articular de la cadera

---

<sup>2</sup> Vilar, J. (2006). Introducción al diseño de experimentos. 2006, de Universidade da Coruña Sitio web: [http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec2\\_3.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec2_3.html)

(variable dependiente). Sin embargo, un diseño puede contemplar el efecto que producen dos variables independientes tienen sobre una dependiente, por lo que los diseños experimentales poseen una gran variación. El establecimiento de que, en un experimento, una variable independiente produce una variación específica (que solo puede ser atribuida a la variable independiente) en la variable dependiente depende fundamentalmente de la manera como esté diseñado el experimento. Los procedimientos estadísticos permiten confirmar o validar el procedimiento empleado, pero una cosa debe ser clara: el hecho de aplicar procedimientos estadísticos no permite afirmar que el experimento está bien diseñado, al punto de que se puede afirmar que las variaciones producidas en los sujetos experimentales sólo y exclusivamente pueden ser atribuidas a la variable independiente. La relación causa-efecto solo puede ser atribuida mediante la aplicación de un pensamiento lógico junto a un diseño bien aplicado. Las siguientes pautas están asociadas a diseños idóneos: a) La adecuada selección de un marco teórico b) La selección apropiada de los sujetos c) El uso de procedimientos estadísticos correctos d) El control de la variable independiente e) La adecuada medición de la variable dependiente f) El control de variables asociadas<sup>3</sup>.

Para el caso de la industria es muy importante el diseño de experimentos, puesto que normalmente se hacen estos en ambientes controlados donde fácilmente puede manejarse la variabilidad que afecta dicho experimento, y donde el error experimental es pequeño por ende habrá poca variación en los resultados permitiendo hallar fácilmente la variable optima de respuesta, sin embargo en el caso de la industria la variabilidad presentada en el experimento será mayor puesto que la influencia de los factores no permiten determinar u obtener un ambiente controlado y por ende los resultados serán más objetivos teniendo en cuenta todo aquello que afecta y tiene significancia.

Marín, JM. (Enero 13, 2013). Introducción al diseño de experimentos. Enero 13, 2013, de UC Sitio web: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf> nos dice:

El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento

---

<sup>3</sup> Ramón, G. (2000). Diseños experimentales. 2000, de Docente – Investigador del Instituto Universitario de Educación Física, Universidad de Antioquia (Colombia). Sitio web: [http://viref.udea.edu.co/contenido/menu\\_alterno/apuntes/ac37-diseno\\_experiment.pdf](http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf)

cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación. La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado. Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

La utilización de los modelos de diseño de experimentos se basa en la experimentación y en el análisis de los resultados que se obtienen en un experimento bien planificado. En muy pocas ocasiones es posible utilizar estos métodos a partir de datos disponibles o datos históricos, aunque también se puede aprender de los estudios realizados a partir de datos recogidos por observación, de forma aleatoria y no planificada. (p.2).

El diseño de experimentos en la industria siempre surge de una necesidad puntual, donde estadísticamente se determina cuales son aquellos factores más relevantes que afectan la variable de respuesta y así obtener mejoras que impacten en la organización que finalmente se ven reflejados en una mayor contribución para los socios. Marín (2013) nos dice:

En el análisis estadístico de datos históricos se pueden cometer diferentes errores, los más comunes son los siguientes:

1. Inconsistencia de los datos: Los procesos cambian con el tiempo, se producen cambios en el personal (cambios de personas, mejoras del personal por procesos de aprendizaje, motivación,...), cambios en las máquinas (reposiciones, reparaciones, envejecimiento,...). Estos cambios tienen influencia en los datos recogidos, lo que hace que los datos históricos sean poco fiables, sobre todo si se han recogido en un amplio espacio de tiempo.

2. Variables con fuerte correlación: Puede ocurrir que en el proceso existan dos o más variables altamente correlacionadas que pueden llevar a situaciones confusas. Por ejemplo, en el proceso hay dos variables  $X_1$  y  $X_2$  fuertemente correlacionadas que influyen en la respuesta, pero si en los datos que se tiene aumenta al mismo tiempo el valor de las dos variables no es posible distinguir si la influencia es debida a una u otra o a ambas variables (confusión de los efectos). Otra situación problemática se presenta si solo se dispone de datos de una variable (por ejemplo de  $X_1$  y no de  $X_2$ ), lo que puede llevar a pensar que la variable influyente es la  $X_1$  cuando, en realidad, la variable influyente es la  $X_2$  (variable oculta).

3. El rango de las variables controladas es limitado: Si el rango de una de las variables importantes e influyentes en el proceso es pequeño, no se puede saber su influencia fuera de ese rango y puede quedar oculta su relación con la variable de interés o los cambios que se producen en la relación fuera del rango observado. Esto suele ocurrir cuando se utilizan los datos recogidos al trabajar el proceso en condiciones normales y no se experimenta (cambiando las condiciones de funcionamiento) para observar el comportamiento del proceso en situaciones nuevas (p.3).

#### 4.1 Planificación del experimento

La experimentación en la actualidad juega un papel muy importante dentro de la industria, ya que cuando se trata de ser más competitivos en un mercado globalizado es necesario ser más efectivos en nuestros procesos generando confianza, solidez y posicionamiento que difiere finalmente en una mayor rentabilidad para la compañía, y no solo se trata de generar ingresos sino de mantener unos bajos costos operativos para generar un impacto en el mercado; es aquí donde radica la importancia de estructurar y modelar muy bien los proyectos de mejora y más aun los que tienen un enfoque al diseño de experimento ya que es necesario incluir diferentes recursos los cuales si no son bien asignados dichos experimentos pueden ocasionar grandes fracasos que se derivan finalmente en pérdidas económicas para la compañía, para ello existen metodologías que pueden facilitar la aplicación del diseño de experimentos obteniendo resultados objetivos y de impacto, Walter A. Shewhart (difundido por Edwards Deming) plantea lo siguiente:

Figura 3. Ciclo PHVA del diseño de experimentos

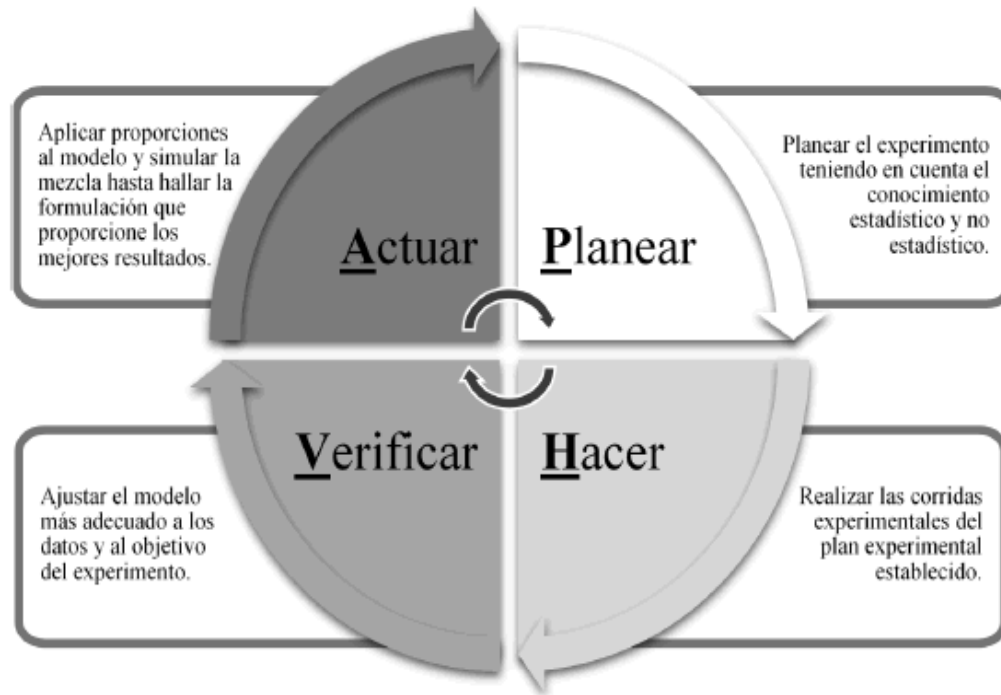


Figura 4. DOE percibido como un proceso.  
Fuente: Autores

Nota. El ciclo PHVA, ideado por Walter A. Shewhart y difundido por Edwards Deming, es un método iterativo de gestión de cuatro etapas: planear, hacer, verificar y actuar; utilizado para el control y la mejora continua de procesos. Fuente: Ortega, D., & Bustamante, M., & Gutiérrez, D., & Correa, A. (Marzo 26, 2014). Diseño de mezclas en formulaciones industriales. Octubre 17, 2014, de Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia Sitio web: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532015000100019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532015000100019).

Joan Ferré, F. (Enero, 2013). Introducción al diseño estadístico de experimentos, Este es el primer trabajo de una serie de artículos cuyo denominador común es divulgar los principios básicos del Diseño Estadístico de Experimentos. En este artículo se justifica la necesidad de utilizar el Diseño Estadístico de Experimentos en la planificación de la experimentación y se presenta una visión global de su aplicación. Enero, 2013, de departamento de química analítica y química orgánica, Universitat Rovira i Virgili Sitio web: [http://www.fbcb.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/curso\\_TopQuim\\_2013/Bibliografia%20RSM/DE\\_un%20articulo%20interesante.pdf](http://www.fbcb.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/curso_TopQuim_2013/Bibliografia%20RSM/DE_un%20articulo%20interesante.pdf), dice:

La experimentación juega un papel fundamental en virtualmente todos los campos de la investigación y el desarrollo. El objetivo de la experimentación es obtener información de calidad. Información que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico,...) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas, etc.

Obviamente la experimentación se debe planificar (diseñar) cuidadosamente para que proporcione la información buscada. Dicha planificación debe considerar dos aspectos importantes relacionados con toda experimentación:

1. La experimentación es normalmente cara. La capacidad de experimentar está limitada por el coste en tiempo y en recursos (personal, productos de partida, etc.). Por tanto, una organización óptima de la experimentación deberá contemplar el menor número de experimentos que permita obtener la información buscada.
2. El resultado observado de un experimento ( $y$ ) tiene incertidumbre:

$$y = \mu + \epsilon$$

Donde  $\mu$  es el resultado “verdadero” (desconocido) del experimento y  $\epsilon$  es una contribución aleatoria, que varía cada vez que se repite el experimento. Por ello, la Estadística, disciplina que proporciona las herramientas para trabajar en ambientes de incertidumbre, juega un papel fundamental en el diseño de los experimentos y en la evaluación de los resultados experimentales.

El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el sistema en estudio y decidir actuaciones futuras. Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el coste elevado de la experimentación no parece adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de los resultados a la mera intuición del experimentador. Parece más razonable utilizar una metodología matemática y estadística que indique como planificar (diseñar,

organizar) la secuencia de experimentos de una forma óptima, de modo que se minimice tanto el coste de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada. Dicha planificación y análisis es el principal objetivo del Diseño Estadístico de Experimentos (p.1-2).

La planificación del diseño de experimentos juega un papel importante para no derrochar esfuerzos y obtener los máximos beneficios, por ende se espera que el análisis de los datos obtenidos luego del experimento arroje conclusiones válidas y objetivas. En general, Myers y Montgomery. (1995). Introducción. En Diseño y análisis de experimentos. (Segunda Edición. Limusa Wiley). (p.14). John Wiley & Sons. INC. New York, USA. 702 p.: Limusa Wiley. “Plantea que las pautas generales para diseñar un experimento son las siguientes: identificación y exposición del problema, luego pasa a la fase de elección de los factores, los niveles y los rangos, luego selección de la variable de respuesta, la siguiente fase es elección del diseño experimental, luego se ejecuta el experimento, se analizan estadísticamente los datos para finalmente realizar las conclusiones y recomendaciones con base a la información obtenida”. (p.14).

Dentro de la planificación existen diferentes etapas determinantes para el éxito del experimento; Joan Ferré, F. (E 2013) nos dice:

Es frecuente realizar la experimentación en diversas etapas secuencialmente. En cada etapa, las series de experimentos se agrupan en diseños denominados matrices de experimentos. La selección de una matriz u otra depende del objetivo de cada etapa, y de otras características.

A continuación se identifican distintos objetivos y los tipos de diseños que se pueden aplicar a cada caso.

#### 4.2 Cribado

Al plantear por primera vez una experimentación no es extraño encontrar una larga lista de factores potencialmente influyentes. Puesto que el número de experimentos que suele requerir un estudio detallado u optimización de un sistema aumenta exponencialmente con el número de factores estudiados, es necesario reducir la lista de factores a un número manejable. Los factores no se deberían conservar o eliminar utilizando razones subjetivas como por ejemplo, escoger aquellos para los cuales se dispone del material adecuado en el laboratorio, o aquellos que son más fáciles de controlar. Se deben cribar en función de su influencia en la respuesta considerando su significancia estadística. Para determinar dicha influencia, se puede realizar una investigación exploratoria con un diseño experimental sencillo, que permita determinar lo más rápidamente

posible (es decir, utilizando el menor número de experimentos) qué factores tienen más influencia en la respuesta y deben ser estudiados en detalle (los factores clave) y cuáles pueden no considerarse porque sus efectos son insignificantes. Entre los diseños adecuados para realizar un cribado destacan las matrices de Hadamard, las cuales permiten estudiar el efecto de hasta  $N-1$  factores con sólo  $N$  experimentos.

#### 4.3 Estudio de los factores

Una vez se han identificado (seleccionados) los pocos factores más importantes, el siguiente paso suele ser estudiar cuantitativamente su efecto sobre la respuesta y sus interacciones. Para este propósito se pueden utilizar los diseños factoriales completos a dos niveles  $2^k$  y los factoriales fraccionados  $2^{k-r}$  entre otros. Éstos últimos contemplan un número menor de experimentos que los factoriales completos a costa de no obtener ciertas informaciones que a priori se consideran irrelevantes.

#### 4.4 Optimización

Una objetivo último de la investigación suele ser la optimización de una o varias respuestas en un producto o proceso. Es decir, conocer qué valores de los factores proporcionan respuestas (rendimiento, sabor, etc.) con la calidad deseada. Estos se pueden conocer calculando un modelo matemático (denominado superficie de respuesta) que relaciona los factores más relevantes con las respuestas. Los experimentos más adecuados para calcular dichos modelos están descritos en los diseños de superficies de respuesta tales como el diseño central compuesto o el diseño de Doehlert. El método secuencial Simplex es una alternativa al cálculo de un modelo matemático para alcanzar las condiciones óptimas. En este método, cada futuro experimento se decide en función de los resultados obtenidos en los experimentos anteriores.



#### 4.5 Estudio de mezclas

Los problemas de mezclas son también muy comunes en las industrias de la química, alimentación y bebida, cosméticos y medicamentos entre otras. Su particularidad es que los factores expresan porcentajes de los constituyentes y suman 100%. Esta restricción requiere el uso de diseños y modelos matemáticos adecuados a este tipo de restricciones.

Por último, si el problema en cuestión no se ajusta a ninguno de los diseños clásicos mencionados anteriormente, aún es posible encontrar un diseño óptimo utilizando algoritmos que permiten seleccionar los experimentos más adecuados de entre una lista de experimentos candidatos.

#### 4.6 Realización de la experimentación

El diseño experimental escogido suele estar descrito mediante variables codificadas. Estas se particularizan para los factores en estudio, se comprueba si los experimentos son posibles y, si es así, se realiza la experimentación en orden aleatorio respecto al orden en el cual están listados. La ejecución en orden aleatorio es necesaria para asegurar que los factores no contemplados introduzcan confusión y sesgo en los resultados.

#### 4.7 Interpretar los resultados

Una vez se dispone de los resultados experimentales se pueden calcular los efectos de los factores, así como sus interacciones. Los test estadísticos permiten comprobar si los efectos calculados son significativos comparándolos con el error experimental. Si se construye un modelo de superficies de respuesta, se pueden calcular los coeficientes por el método de los mínimos cuadrados y se puede evaluar el modelo realizando réplicas de ciertos experimentos y aplicando el test ANOVA. El modelo se puede utilizar para buscar la zona óptima matemáticamente.

Es importante notar que la realización de estas etapas es cíclica. La información obtenida al realizar una serie de experimentos se debe integrar para planificar la experimentación posterior. Quizás entonces se comprende mejor el problema y se pueden redefinir o concretar más los objetivos, se pueden descartar factores que se ha visto que no eran importantes, o modificar su dominio experimental, con ello se planea una nueva experimentación, y así sucesivamente. Por este motivo, se prefiere normalmente efectuar los experimentos en pequeñas series. (p.9-12).

#### 4.8 Aplicaciones del diseño experimental en la metalurgia

A continuación algunas aplicaciones de diseños de experimentos en el sector de la metalurgia, sector donde más interés ha mostrado por esta metodología dado los resultados tan exitosos obtenidos de dichos experimentos y que recae en una mayor contribución para los dueños y accionistas de las compañías del sector.

#### 4.9 Aplicación de los diseños factoriales en el procesamiento de minerales

Los diseños experimentales que se usaron en distintas empresas desde el siglo 19 permitió en las industrias identificar y controlar a los factores que más correlación tenía con la producción (función respuesta), lográndose aumentar la producción con el mínimo costo. Es importante en la actualidad enfocar los Diseños experimentales en el procesamiento de minerales de la metalurgia extractiva, con la finalidad de mejorar la producción en todos los aspectos. En procesamiento de minerales uno de los factores importantes que se debe estudiar es la influencia de estos con la función respuesta, en este caso la recuperación del concentrado de mineral y las leyes de las mismas, la mayoría de los factores que se debe estudiar es como ejemplo, los colectores, depresores, activadores, tiempo de acondicionamiento, condiciones de la pulpa, granulometría del mineral y otros. Para un estudio sistematizado de un problema en procesamiento de minerales es importante conocer los problemas en base a la identificación de las variables independientes y dependientes (Función respuesta). Por ello es de suma importancia la estadística en la Ingeniería Metalúrgica y en todas las otras Ingenierías.

#### 4.10 Pruebas metalúrgicas con diseño factorial

En metalurgia, especialmente en flotación de minerales, el proceso es complejo, del tipo caja negra (blackbox). La relación del criterio de optimización a las variables independientes del proceso (función respuesta), puede ser descrita con el siguiente modelo matemático. Sea la ecuación de la función respuesta:

$$\gamma = \emptyset(x, U, Z) \quad (1.1)$$

Donde:

Y: Función respuesta.

X: Variable controlable

U: Variable no controlable

Z: Variable desconocida

Las variables no controlables pueden medirse pero no controlar, y las variables desconocidas no pueden medirse ni controlarse y se encuentra dentro de las variables aleatorias; estas son incluidas dentro de la función respuesta como se puede ver en la ecuación (1.1)

Para disminuir la influencia de las variables no controlables y las desconocidas en la función respuesta es necesario que las variables controladas tomen un rango o parámetro de operación esto se representa mediante la ecuación:

$$\gamma = \emptyset(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon \quad (1.2)$$

Donde:

$\epsilon$ : Variable aleatoria (variable no controlada y desconocida).

$X_n$ : Variables controladas o estudiadas.

En el diseño factorial  $2^k$  se estudian en la mayor parte de los casos los efectos de los factores y las “n” interacciones de las mismas.  $N = 2^k$  indica el número de tratamientos que deben hacerse con los “K” factores y “n” interacciones.

En la notación  $2^k$  los niveles superior e inferior están indicados por los signos (+) y (-) ó (+1) y (-1) respectivamente.

Investigar con diseño experimental es determinar los experimentos que conviene usar para poder hacer un mejor estudio de las variables, al mismo tiempo determinar la influencia de cada una sobre la función respuesta. Es por ello importante para que una función respuesta sea la mejor (óptima) en procesamiento de minerales identificar y seleccionar las variables que más influyen para ello existe los diseños experimentales completos, fraccionados y de Planckett Burman que permite estudiar hasta 20 variables o factores.

#### 4.11 Primera etapa de selección de variables

Es una de las etapas más importantes en la cual se debe definir las variables o factores a estudiar, estoy convencido de que en esta etapa el factor humano es importante, porque mediante el cual los rangos serán elegidos adecuadamente (con lógica), de no ser así el diseño aplicarse será poco confiable por no decirlo nulo. Si tomamos un ejemplo simple de realizar una flotación de zinc y en planta o históricamente se determinó que el colector xantato se usa un promedio de 30g/TM, sería en vano escoger parámetros de 10g/TM y 60g/TM para las variables de investigación, debido a que estos datos están lejos del dato promedio. Para la selección de las variables es necesario usar todos los conocimientos en un proceso metalúrgico así como un diagnóstico de todos los antecedentes de la operación, ya que será de mucha importancia para la identificación las posibles variables las cuales se someterán a pruebas de diseño

factorial. Como ya mencionamos la codificación de las variables están en rango inferior con (-1) y el rango máximo con (+1) tomando como promedio cero (0)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Paitan, A. (Diciembre 13, 2011). DISEÑOS EXPERIMENTALES APLICADO AL PROCESAMIENTO DE MINERALES. Diciembre 13, 2011, de LIBRO DISEÑOS EXPERIMENTALES APLICADO AL PROCESAMIENTO DE MINERALES Sitio web: <https://es.scribd.com/doc/76391747/libro-disenos-factoriales-aplicado-a-procesamiento-de-minerales>.

## 5. METODOLOGÍA

En la investigación se aplicará un enfoque estadístico en el diseño y análisis de experimento para la resolución del problema que tiene la compañía. La primera fase consiste en una planeación previa del experimento, la cual está compuesta por las tres primeras etapas, las demás son de análisis y conclusiones del experimento; estas etapas son:

Identificación y exposición del problema. En el cual pretende tener una mayor comprensión de los factores influyentes bajo estudio y la solución al problema que se está presentando.

Elección de los factores, los niveles y los rangos. Se pretende identificar factores potenciales del diseño así como los factores perturbadores que influyen en el desempeño del proceso.

Selección de la variable de respuesta. Identificar variable que proporcione información veraz y confiable del proceso bajo estudio.

Elección del diseño experimental. Implica considerar tamaño de la muestra, la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos del experimento y mirar si es necesario o no la formación de bloques u otras restricciones que tienen que ver con la aleatorización.

Realización del experimento. Es importante verificar que la planeación del experimento se esté cumpliendo de acorde a lo establecido, para evitar la invalidez del experimento y que este sea exitoso arrojando datos y resultados satisfactorios.

Análisis estadístico de los datos. Hacer uso de herramientas estadísticas para el análisis de los datos con el fin de obtener resultados y conclusiones de carácter objetivos, generando confiabilidad y validez en la información que arroja dicho estudio permitiendo tomar decisiones efectivas que minimizan el problema viéndose retribuido en la rentabilidad de la compañía.

Conclusiones y recomendaciones. Determinar conclusiones claras y concisas acerca de los resultados y recomendar acciones encaminadas a mejorar el desempeño del proceso con el fin de minimizar significativamente el número de unidades defectuosas que se presentan en el proceso bajo estudio y que tenga un impacto en la rentabilidad esperada por la compañía.

## 5.1 DESCRIPCION DE ACTIVIDADES

Se busca aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de experimento para la resolución del problema que tiene la compañía, minimizando la variabilidad y generando reproducibilidad en el proceso que se ve reflejado en unidades conformes mejorando así las condiciones del proceso obteniendo mejores resultados y estableciendo un proceso bajo control que se verá retribuido en las ganancias para las accionistas de la compañía.

## 6. DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE) EN PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN

### 6.1 DIAGNÓSTICO ESTADO ACTUAL

La empresa Integrando LTDA., dentro de la cadena de valor (VSM), tiene el proceso de tratamiento térmico de piñones traseros, el cual es el valor agregado y diferenciador dentro del mercado de moto partes (Carlos Mario Valencia-Director comercial Integrando LTDA., 2016); sin embargo también es un proceso crítico y restrictivo en la línea de producción dada la variación del mismo, además falta de capacidad con respecto a la calidad. Si se tiene en cuenta lo anterior, y que el proceso de tratamiento térmico se realiza por inducción el cual no se encuentra parametrizado, por ende es complejo controlar y estabilizar el proceso bajo unas condiciones en las cuales se garantice la calidad.

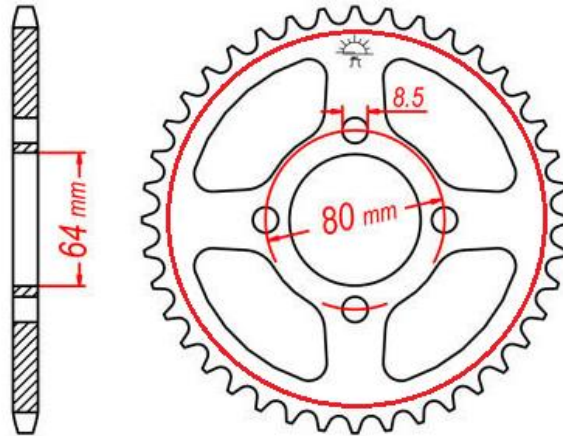
#### 6.1.1 Condiciones de calidad de la dureza

Las estadísticas que arroja el proceso se refleja que requiere atención, puesto que dentro del indicador de capacidad de proceso ( $C_p$ ) que maneja el departamento de calidad de la compañía, se observa que este se encuentra por debajo del objetivo, con un  $C_p = 0.8$ , contra el esperado  $C_p = 1.33$  (Alejandro Jaramillo-Líder departamento de calidad Integrando LTDA., 2016). Esto es soportado con los datos documentados durante la operación, los cuales para el año 2015 arrojan un 19% de participación, con un total de 861 unidades defectuosas y dadas de baja por no cumplir especificaciones de dureza; para lo que va corrido del año 2016 con un 25% de participación y encabezando la lista de defectos, con un total de 345 unidades defectuosas y dadas de baja por no cumplir con especificaciones de dureza (departamento de calidad Integrando LTDA., 2016). Las especificaciones de dureza están dadas en dureza Rockwell C, y según especificaciones de calidad el valor nominal de este debe ser 40 HRC, con tolerancias  $\pm 5$  HRC, este valor está parametrizado bajo las normas estándar que rigen para la fabricación de piñones para motocicletas.



Según esta norma se debe de garantizar la dureza en todo el perímetro del piñón como se muestra en la figura:

Figura 4. Plano y medidas geométricas de un piñón trasero.



Fuente. Diseño investigador

La zona más crítica y que requiere medición y control es la que comprende desde el inicio de los dientes del piñón hasta la línea roja demarcada ya que aquí es donde se generan los mayores esfuerzos mecánicos, además esta zona hace contacto y engrana con los eslabones de la cadena generando arrastre en la relación de la motocicleta lo que finalmente produce que esta tenga movimiento. El proceso de tratamiento térmico por inducción está diseñado de tal forma, que el calor lo distribuye y concentra en la zona crítica identifica en la figura xxx, esto logra parametrizando las variables de la maquina las cuales se pueden graduar o calibrar de acuerdo a lo deseado.

En la figura 5 se ilustra como el piñón toma una tonalidad color naranja en la zona crítica que se requiere garantizar el valor de dureza.

Figura 5. Toma de temperatura en proceso de tratamiento térmico de piñón trasero.



Fuente. Foto investigador en planta de producción Integrando LTDA.

Las variables que intervienen en el proceso deben de parametrizarse de tal manera que se garantice la especificación de dureza del piñón, estas variables son graduables y se pueden ajustar de acuerdo a la necesidad; sin embargo el desconocimiento de la tecnología y la falta de identificación de las variables más incidentes y relevantes no permiten tener el proceso bajo control estadístico ocasionando variación y reflejándose en un gran número de unidades rechazadas por estar fuera de especificación sea por el límite inferior o superior de especificación.

#### 6.1.2 Parametrización de las variables que intervienen en el proceso de tratamiento térmico

Se evidencia que la metodología utilizada para determinar los valores de las variables es *un factor a la vez OFAT*, el cual consiste en llevar a cabo unas pruebas en las cuales se mantiene constante o fijas todas las variables y se varia

una sola variable a la vez, esto genera que se inviertan muchos recursos como tiempo y unidades de piñón que finalmente como resultado es la poca trascendencia en la eficacia del experimento, además no se conoce el efecto de mayor relevancia que incide en el proceso. No considera también el efecto combinado de las variables de entrada, que recae en la dificultad y la cantidad de tiempo que se requiere para identificar esas variables críticas y significativas y poderlas optimizar de tal manera que se garantice la especificación de dureza que exige el cliente, la norma y el sistema de gestión de la calidad de Integrando LTDA.

Explorar y determinar los efectos combinados de los factores de entrada o interacciones de los mismos con la variable de respuesta que es la dureza, el objetivo de la compañía con respecto al proceso de tratamiento térmico, puesto que al lograr esto confirma que se encuentra bajo control estadístico reflejándose en la medición y cumplimiento de la especificación que está establecida por la compañía. Sin embargo dentro de sus estudios no hay obtenido lo deseado, ya que como lo soportan los datos estadísticos suministrados por el departamento de calidad este proceso se encuentra dentro de los más significativos en términos de unidades defectuosas y que por consiguiente no han logrado establecer aun, una parametrización de variables que pueda llevarlo a unos resultados óptimos representados en la estabilidad del proceso, es decir, un proceso controlado bajo unas condiciones previamente establecidas permitiendo predecir y suponer un valor de dureza la cual dentro de la investigación será la variable de respuesta.

### 6.1.3 Proceso de tratamiento térmico por inducción

La máquina en la cual se realiza el proceso de tratamiento térmico es particular, ya que es un proceso que se realiza por inducción, como lo explica el, Grupo Trateriber. (2013). Temple por inducción. España: AALBERTS INDUSTRIES. , “Basado en los mismos principios que el temple convencional pero con el valor añadido de ser un tratamiento local (sólo aplicado a una o varias zonas de la pieza), el temple por inducción consiste en enfriar de manera controlada piezas de acero previamente calentadas a temperaturas superiores a 800°C. La gran diferencia de la inducción con otros temples reside en la técnica utilizada para el calentamiento. En este tipo de temple se utilizan bobinas de cobre fabricadas a medida de la zona a calentar. Estas bobinas están conectadas, podemos programar la entrega de potencia (Kw) y frecuencia de corriente (Hz). Al hacer circular un campo magnético alterno por estas bobinas (inductores) obligamos a la pieza tratada a comportarse como un electroimán que se opone al flujo magnético natural (Corriente de Foucault), fenómeno que se traduce en generación de calor por efecto Joule de manera controlada. En resumen, podemos ajustar

perfectamente la temperatura que queremos concreta de esta. Gracias a esta flexibilidad del proceso se pueden conseguir de manera estable los requisitos de dureza y penetración de capa solicitados por el cliente. Una vez calentada la pieza gracias a un correcto diseño de bobina de la pieza y control de todos los parámetros del generador, empieza la fase de enfriamiento. En inducción siempre se utilizan medios líquidos basados en agua desmineralizada mezclada a diferentes % de polímeros, según requiera cada pieza. Para un correcto enfriamiento (temple) se tiene especial atención al diseño de la ducha, parámetros de composición del líquido de temple y datos de entrega (presión, caudal y temperatura del líquido de temple). La dureza final obtenida dependerá básicamente del material base (composición) y los parámetros de proceso aplicados (temperatura y enfriamiento)". Para el caso de Integrando LTDA., la máquina de inducción es la siguiente:

Figura 6. Máquina de calentamiento por inducción para tratamiento térmico de piñones traseros.



Fuente. Foto de investigador en planta de producción Integrando LTDA.



Esta máquina fue adquirida por Integrando a una compañía estadounidense especialista en procesos de tratamiento térmico por inducción, Induction Technology Corporation (ITC), la cual se encargó de toda la instalación y funcionamiento de las bobinas de inducción; estas permiten generar el campo magnético necesario para calentar el acero rápidamente y llevarlo a la temperatura deseada para lograr obtener dureza del material. Las bobinas como se muestra en la figura 7 tienen un tamaño de acuerdo a la referencia que se va a temprar, ya que el calor es localizado se requiere que la masa este en una posición con respecto al perímetro de la bobina logrando establecer la conductividad de este campo lo que finalmente genera que se produzca calor térmico en términos de tiempo muy cortos.

Figura 7. Bobinas de máquina de calentamiento por inducción.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Sin embargo, según Andrés Duque-Director de Producción de Integrando LTDA., (2016), afirma que el 90% de la producción se realiza en la bobina número 2, de izquierda a derecha de la figura 7 puesto que el restante 10% son productos de baja rotación que finalmente no son de relevancia y que no tienen un impacto significativo en la facturación mensual de la compañía, obviándose para efectos del experimento ya que lo que se pretende obtener como objetivo es atacar el mayor porcentaje que representa de la producción y que finalmente esta es la que se está aportando en los indicadores que maneja el departamento de calidad de la compañía. Por ende, el experimento se enfocara en realizar ensayos en la bobina

numero 2 mencionada anteriormente en el número de corridas que arroje el diseño del experimento (DOE) y se tendrán los recursos necesarios para poder llevar a cabo lo anterior.

Adicional a esto cabe notar que existe un tanque que contiene el líquido de enfriamiento donde el piñón luego de calentarse cae en este y se genera el choque térmico. El tanque se muestra en la siguiente figura 8:

Figura 8. Tanque de enfriamiento de máquina de tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

El líquido de enfriamiento puede variar de acuerdo al material que se desea templar por esta técnica de templado. Para el caso de Integrando LTDA., de acuerdo al material que se usa para la fabricación de los piñones utiliza como líquido de enfriamiento un polímero llamado QUENCHANT que es mezclado con agua, agua destilada y se le adiciona un anti-espumante; adicional a esto dentro del tanque se encuentran unas flautas que se encargan de generar la agitación de la mezcla una vez esta, pasa por un sistema de refrigeración Chiller que permite mantener una temperatura controlada. Para controlar la estabilidad de este líquido se miden la cantidad de sólidos disueltos de la mezcla, dicha medida se da en

*GRADOS BRIX*, la cual es fundamental para garantizar que el choque térmico se dé en unas condiciones óptimas que permitan generar el temple del material utilizado para la fabricación de piñones; esta medida se obtiene tomando una muestra de la mezcla la cual es depositada en un dispositivo como se muestra en la figura 9 que arroja los grados brix.

Figura 9. Dispositivo para el análisis de más muestras del líquido de enfriamiento de máquina para tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador en planta de producción Integrando LTDA.

En la empresa se toma muestra de este líquido de acuerdo a una frecuencia establecida para controlar que este se encuentre dentro de los valores según especificaciones técnicas evitando generar problemas en el proceso de tratamiento térmico ya que esta es una de las variables que inciden y se debe de tener en cuenta cuando se da la puesta punto de la calidad de la operación antes de comenzar la producción en serie.

La máquina también cuenta con regulador de potencia como se ilustra en la figura 10, esta se trasmite y se convierte en calor °C cuando se genera el campo magnético y este a su vez hace contacto con la pieza presentándose el fenómeno calorífico que permite darle temple y un valor de dureza luego del choque térmico con liquido de enfriamiento. Cabe notar que esta potencia está sujeta a una



frecuencia previamente establecida por el proveedor de la máquina, esta se calibra de acuerdo a las necesidades del cliente por ende el proveedor está en todo el proceso de instalación, ajuste y puesta en marcha del proceso.

Figura 10. Centro de control de potencia de bobina de máquina de tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Esta es una de las variables que inciden en el proceso y se debe de controlar para evitar que esta exceda la temperatura en la pieza reflejándose en la deformación del material que finalmente lo que ocasiona es que se funda y pierda sus características iniciales antes de comenzar la fase de calentamiento, por consiguiente siempre en la parametrización del equipo se tiene en cuenta este factor para garantizar que el proceso de tratamiento térmico cumpla con las leyes y conceptos técnicos *de procesos de tratamientos térmicos por inducción* el cual se requiere cierto conocimiento para establecer los rangos en los que se debe de trabajar para evitar sobrecargas o sobretensiones en la máquina.

Cabe resaltar que además de las variables anteriormente mencionadas también se encuentra una variable que es clave en el proceso y que está también influye en que la pieza se funda, es el tiempo de exposición (Figura 11) al campo magnético que se genera dentro de la bobina puesto que la temperatura es directamente proporcional al tiempo que la pieza se encuentre allí, entonces esta



variables están altamente relacionadas entre sí, según Jaramillo A., 2016 – Jefe de calidad Integrando LTDA.

Figura 11. Control de mando para variable tiempo de exposición de máquina de tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Para efectos del experimento se detalla claramente el proceso y todo lo que acontece alrededor de este, con el fin de tener una perspectiva más objetiva y concisa de lo que se pretende estudiar y experimentar ya que de esto depende el éxito y el alcance que puedan llegar a tener los resultados para la compañía la cual espera que se impacte aquellas situaciones que no le están generando valor y que por el contrario están atentando contra el core del negocio.

## 6.2 ELECCION DE LOS FACTORES, NIVELES Y RANGOS DEL DISENO DE EXPERIMENTOS EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO

### 6.2.1 FACTORES DEL DISENO DE EXPERIMENTOS

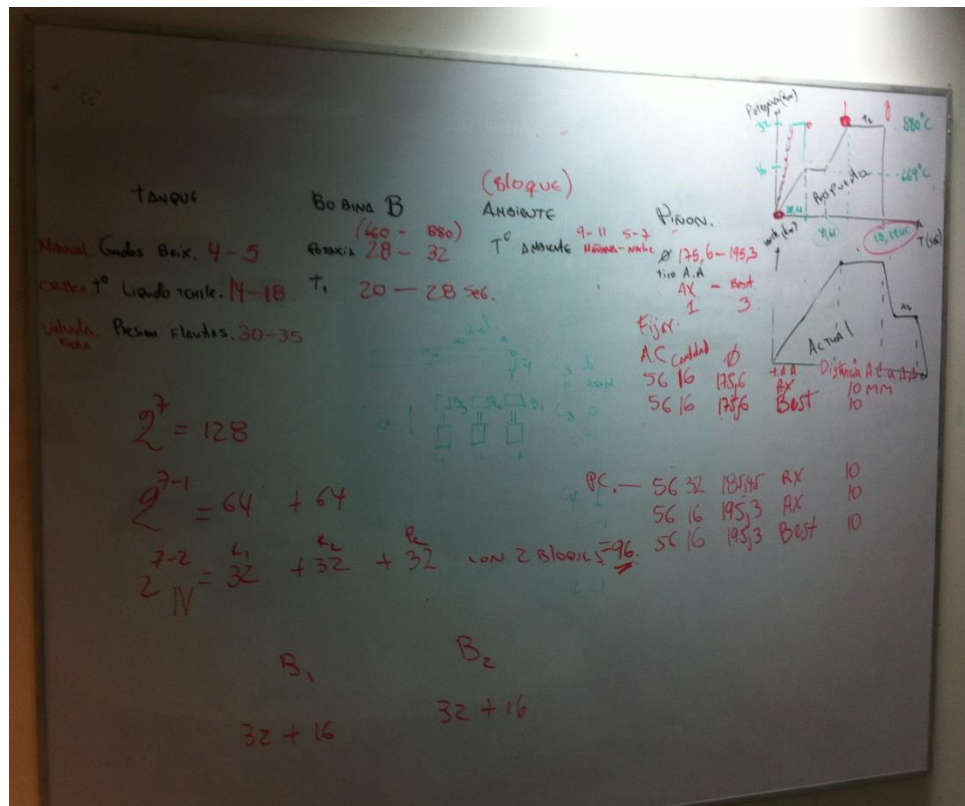
Teniendo en cuenta el anterior diagnóstico y las diferentes opiniones, conceptos de los expertos del proceso de tratamiento térmico por inducción que existe en la compañía y con el cual se le da dureza a los piñones, se evidencia diferentes factores que inciden y hacen que la dureza llegue a los valores deseados sin embargo estas variables no se controlan en su totalidad. Cabe resaltar que cada factor tiene diseñado su sistema que permite regular y controlar el estado de esta y desde estos se pueden llevar a diferentes escenarios permitiendo que el diseño se pueda aplicar ya que este exige un número corridas como pruebas del experimento. Al evaluar el proceso se evidencio que se requería un conocimiento solido en procesos de tratamiento térmico el cual permitió establecer los factores que finalmente son objeto de estudio y que pretenden dar respuesta al objetivo.

Con estos factores se desea provocar la ocurrencia del evento que surge como invitación del experimento y que tiene como objetivo generar información relevante del proceso que permite la aplicación de las fases del experimento, detección (factorial fraccionado, selección factores del proceso), caracterización (full factorial, selección factores incidentes), optimización (diseños multinivel, selección valores óptimos factores incidentes). Esta estrategia experimental permite responder a las preguntas en forma completa; además la metodología examina cada posible combinación de factores en todos los niveles de prueba.

La elección de los niveles y rangos están sujetos a la disposición de la compañía en cuanto al espacio para la realización del experimento por ende para efectos de este los niveles seleccionados son 2; esto es afirmado por Duque A., 2016-Director de producción Integrando LTDA.) quien es Black Belt Lean Six Sigma soportando la escogencia de los niveles.

Para el caso de los rangos se abre espacio de discusión dentro de la compañía con los expertos del proceso como se evidencia en la figura 12 donde finalmente se dieron los valores de los rangos codificados (-1,+1) que se requieren para la generación del diseño en el software Minitab.

Figura 12. Planeación del diseño de experimento DOE en proceso de tratamiento termico.



Fuente. Foto investigador oficina de administración de la producción Integrando LTDA.

## 6.2.2 Factor potencia bobina de inducción

Este factor es controlable y permite ser modificado para efectos del experimento como se observa en la figura 13. Además este factor es el encargado de generar el campo magnético de la bobina, así como el control de la intensidad de este permitiendo para efectos del experimento variarlo fácilmente. Sin embargo dentro de la teoría esta intensidad debe de controlarse con el tiempo de exposición ya que de no hacerse se genera fisura o en casos extremos fundición del material ocasionando pérdidas económicas ya que este no puede ser recuperado o llevado a su estado inicial pues se requieren procesos de metalurgia para realizarlo.

Figura 13. Control de mando para factor potencia bobina en maquina de tratamiento termico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 28 kw

Valor máximo (+1) = 32 kw

### 6.2.3 Factor tiempo de exposición al campo magnético

Este factor es controlable y puede ser modificado para efectos del experimento como se observa en la figura 14. Este tiene como objetivo controlar el tiempo que se desea o se requiere que la pieza este expuesta al campo magnético ya que si no se tiene en cuenta a la hora de efectuar el temple puede ocasionar efectos de gran impacto en las finanzas de la compañía puesto que generaría unidades defectuosas no re procesables castigando la rentabilidad de la misma.



Figura 14. Control de mando para factor tiempo de exposición de máquina para tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 20 seg.

Valor máximo (+1) = 28 seg.

#### 6.2.4 Factor Grados Brix liquido de enfriamiento

Este factor es controlable y puede ser modificado para la realización del experimento. Tiene como objetivo controlar la cantidad de sólidos disueltos en la mezcla que está compuesta por el polímero Quenchant, agua, agua destilada y anti-espumante. Este valor se mide en *GRADOS BRIX* y se hace tomando una muestra de la mezcla y depositándola en un dispositivo como se muestra en la figura 15 el cual finalmente arroja el valor según la concentración de estos sólidos en la mezcla.

Figura 15. Dispositivo para analisis de liquido de enfriamiento de maquina de tratamiento termico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 4 Grados brix.

Valor máximo (+1) = 5 Grados brix.

#### 6.2.5 Factor temperatura liquido de enfriamiento

Este factor es controlable y puede ser modificado para efectos del experimento. El objetivo de este factor dentro del proceso es mantener el líquido en una temperatura estable ideal para generar el estado necesario para que la mezcla reaccione con el material que fue previamente calentado; esta condición se requiere para que la reacción sea homogénea en la superficie donde se focaliza el temple por inducción. Esto se logra ya que el tanque se encuentra conectado a un chiller acondicionado en la parte exterior de la planta.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 13 °C

Valor máximo (+1) = 18 °C

#### 6.2.6 Factor presión flautas de tanque de líquido de enfriamiento

Este factor es controlable y es modificable para efectos del experimento. El objetivo de este es generar la agitación constante de la mezcla de líquido de enfriamiento y esta puede ser alta o baja ya que cuenta con un regulador. Recoge el líquido por medio de una bomba como se observa en la figura 16 y expulsa nuevamente este pero a una presión la cual permite la agitación de este líquido dentro del tanque.

Figura 16. Válvula de control de presión de flautas en máquina de tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

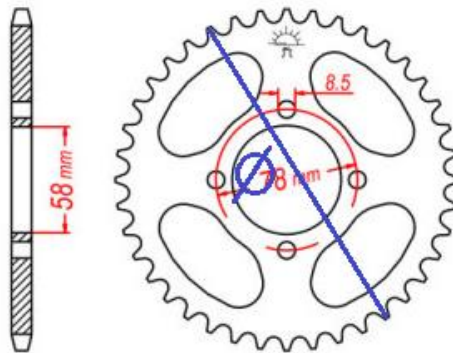
Valor mínimo (-1) = 50 PSI

Valor máximo (+1) = 90 PSI

### 6.2.7 Factor diámetro de piñón trasero

El factor es controlable y permite ser modificado para efectos del experimento. El factor hace relación al diámetro que se requiere sea fabricado el piñón ya que puede variar en esta medida geométrica, por ende la necesidad parte del cliente y es quien especifica como desea el producto, sin embargo estos valores se mantienen en un rango como se muestra a continuación.

Figura 17. Esquema de un piñón trasero de acero



Fuente. Diseño del investigador

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 175,6 mm

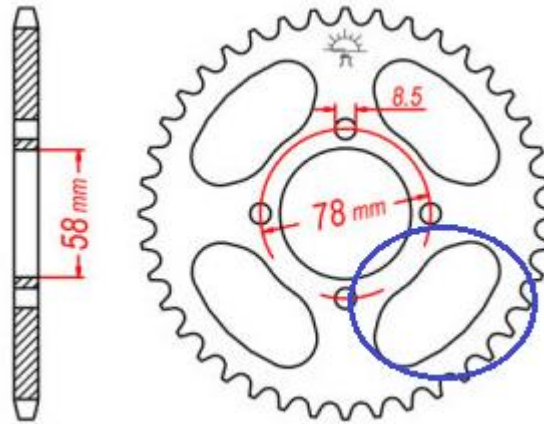
Valor máximo (+1) = 195,3 mm

### 6.2.8 Factor tipo de agujero de alivio de piñón trasero

Este factor es controlable y puede ser modificado para la aplicación del experimento. Este se refiere a los agujeros internos que lleva el piñón como se observa en la figura 18 en color azul y que tienen como función quitar peso y alivianar la carga, esto se debe al tipo de material en el que es fabricado el piñón el cual tiene un alto porcentaje de carbono haciéndolo muy pesado. El diseño de agujero de alivio es especificado por el cliente y así mismo es la especificación en planta para su fabricación.



Figura 18. Plano de piñón trasero ilustrando agujeros de alivio



Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.

Este factor tiene como rangos los siguientes valores:

Valor mínimo (-1) = 1

Valor máximo (+1) = 3

Donde 1 hace referencia al tipo de agujero de alivio de nombre *AX* por descripción interna de la compañía y 3 al tipo de agujero de alivio con nombre *BEST*.

#### 6.2.9 Factor turno de trabajo

Dentro del análisis que se realizó se identificó un factor perturbador o de ruido el cual se denominó como bloque para la realización del experimento ya que por experiencia de los expertos del proceso han evidenciado que se presenta variación en los cambios de turnos, es decir, que la temperatura ambiente incide en la estabilidad del proceso y por ende se tienen comportamientos diferentes cuando se trabaja en la mañana y cuando es en la tarde, esto es afirmado por Jaramillo A., 2016 - Jefe de calidad Integrando LTDA., donde además menciona que en el análisis estadístico del proceso se observa claramente cómo se genera una variación cuando confronta los datos obtenidos en el turno de la mañana con respecto al turno de la tarde y adicional a esto dentro del turno, es decir, que se evidencia una variación notoria en el turno de la mañana mientras que en el turno de la tarde esta variación no es tan repetitiva y se presenta por lapsos de tiempo bastante largos.

Por consiguiente se determinó que en el turno de la mañana el horario para la primera corrida del experimento sería entre las 9:00 a.m. y 12:00 p.m. ya que como lo afirma Jaramillo A., 2016; en la gráfica de control de este proceso se observa una variación notoria en este horario lo cual soporta que se requiere incorporar este factor en el diseño del experimento DOE. Para la réplica del experimento en el turno de la tarde se determinó el horario que estaría entre las 4:00 p.m. y 7 p.m. ya que según el control estadístico que llevan del proceso es en este donde el proceso está más estable y la variación se encuentra dentro de los límites de control.

### 6.3 Variable de respuesta del diseño de experimentos en proceso de tratamiento térmico por inducción

La variable que se desea estudiar y conocer a fondo, así como la interacción de los efectos individuales y combinados que inciden en que esta no esté dentro de las tolerancias establecidas, además que se desea que siempre se comporte de esa manera es la *DUREZA*, que se define como lo dice Calle, G.. (2015). DUREZA BRINNEL. 2015, de UTP Sitio web: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/DurezaHB.htm> “Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador o penetrador), de determinada forma y dimensiones.

Un análisis de la anterior definición nos lleva a las siguientes conclusiones: 1) la dureza, por definición, es una propiedad de la capa superficial del material, no del material en sí; 2) los métodos de dureza por indentación presuponen la presencia de esfuerzos de contacto, por lo tanto la dureza puede ser cuantificada como tal; 3) el indentador o penetrador no debe sufrir deformaciones residuales”. Esta dureza está dada en Rockwell C que tiene como siglas HRC; y que para el caso de la compañía, del sistema de gestión de calidad y del departamento de calidad de la misma el valor nominal establecido para la dureza es de 40 HRC, con tolerancias  $\pm 5$  HRC en todo el perímetro del piñón que es donde finalmente se focaliza el temple por inducción.

En Integrando LTDA., para la obtención de la dureza se utiliza dispositivos como se evidencia en la figura 19 los cuales son prácticos y confiables permitiendo tomar el valor en un tiempo corto; además este valor es corroborado con una medición tomada en un durómetro de bancada, dispositivo utilizado para la medición que realiza el departamento de calidad de la compañía, para verificar dos aspectos importantes: 1) Que el personal que esta cargo del proceso esté

realizando la medida y tomando dato de esta; 2) La medición de los dispositivos prácticos es confiable y se encuentra dentro de los rangos de tolerancia aprobados por la empresa y establecidos dentro del sistema de gestión de calidad que tiene la compañía y que esta soportado bajo una norma técnica internacional.

Figura 19. Dispositivo para la toma de dureza Rockwell C.



Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.

La revisión de la dureza se realiza en cuatro puntos de la circunferencia del piñón y que geométricamente se puede ver cómo los 4 cuadrantes, esto con el fin de garantizar que en todo el perímetro la dureza se encuentre dentro de especificaciones, esto debido a que el piñón gira haciendo contacto con la cadena, engranando con esta por ende se requiere que este soporte los esfuerzos mecánicos generados.

## 6.4 ELECCION DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR INDUCCIÓN

### 6.4.1 Fase de detección

#### 6.4.1.1 Selección de factores y niveles

Para el diseño de experimentos se definió que lo más favorable y que permite tener una confianza en la información es manejar 2 niveles para el experimento, además que agiliza la toma de datos. Adicional a esto se debe tener en cuenta que se está entorpeciendo el proceso ya que se debe disponer de la máquina por completo para poder interactuar con ella y lograr obtener información que permita estadísticamente obtener los valores más óptimos para lograr la dureza que está estipulada en las especificaciones de la norma de gestión de calidad de la compañía.

Por consiguiente tenemos la siguiente ecuación como resultado de la obtención de los niveles y sus factores:

$$2^7$$

Donde:

2= Número de niveles del DOE

7= Número de factores que inciden en el proceso

Si se hablara de un diseño FULL FACTORIAL obtendríamos la siguiente ecuación (1.2) que mejor nos otorgaría información para el análisis estadístico de los datos

$$2^7 = 128 \quad (1.2)$$

Sin embargo se cuenta con una restricción y es la disponibilidad de la máquina por ende se debe tener presente esta novedad para la selección del diseño del experimento.

#### 6.4.1.2 Selección de bloques del diseño de experimento DOE

Los bloques son usados para separar y entender los factores que son ruidos y cómo estos afectan el experimento. Los bloques son seleccionados de tal manera que la variación dentro del bloque sea menor que entre bloques.

Como bloque se tiene el turno de trabajo; siendo turno 1 horario de la mañana y turno 2 horario de la tarde, es decir, que se tienen 2 bloques conformado de la siguiente manera:

Bloque 1 = Turno 1 mañana

Bloque 2 = Turno 2 tarde

#### 6.4.1.3 Selección de puntos centrales

Un punto central es simplemente el ajuste del punto medio de todos los factores (por lo general, un valor codificado de "0"). La adición de los puntos centrales de un diseño es una forma eficiente para la prueba de la curvatura, sin necesidad de añadir un gran número de corridas experimentales. Sin embargo los puntos centrales no afectan las estimaciones de los efectos habituales en los diseños  $2^k$ . Como novedad se tiene que siempre existe el riesgo de curvatura cuando se utilizan diseños de dos niveles.

Para el caso de Integrando LTDA., se definió que de las 3 posibles maneras que se utilizan para definir los puntos centrales es *"el número de corridas más uno"*.

#### 6.4.2 Selección resolución del experimento

Para el experimento se definió una resolución IV como se muestra en la figura 20 que permite el software Minitab seleccionar cuando se va a crear el diseño factorial.

Figura 20. Listado de resoluciones del diseño factorial en software Minitab.

Crear diseño factorial - Mostrar diseños disponibles

Diseños factoriales disponibles (con resolución)

Corrida	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Compl	III												
8		Compl	IV	III	III	III								
16			Compl	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Compl	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Compl	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Compl	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Diseños de Plackett-Burman de resolución III disponibles

Factores	Corridas	Factores	Corridas	Factores	Corridas
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Ayuda Aceptar

Fuente. Software Minitab 15

Donde se obtiene la siguiente ecuación (1.3)

$$2_{IV}^{7-2} \quad (1.3)$$

Siendo;

2= número de niveles

7-2=  $\frac{1}{4}$  de fracción par el número de corridas.

IV= Indica el número cuatro e indica que el modelo es de resolución 4

#### 6.4.3 Selección de réplicas para diseño de experimentos DOE

Para el DOE se determinó que el número de réplicas para el modelo que mejor logra obtener una mayor cantidad de información es aplicar 2 réplicas a este, teniendo más interacción con el proceso y por ende más conocimiento de cómo opera este por consiguiente más relación con el sistema.

#### 6.4.4 Selección del modelo de factorial fraccionado

La selección del modelo que mejor da respuesta a lo que se desea estudiar es el siguiente

$$2_{IV}^{7-2} = 3^2 + 3^2 + 33 \text{ CON 2 BLOQUES} = 97 \quad (1.4)$$

Donde;

$2_{IV}^{7-2}$  Es la resolución del modelo

$3^2$  Es el número de corridas de la réplica 1

$3^2$  Es el número de corridas de la réplica 2

33 Es el número de puntos centrales (corridas).

Bloque 1 = turno 1 mañana horario comprendido entre las 9:00 a.m. y 12:00 p.m.

Bloque 2 = turno 2 tarde horario comprendido entre las 4:00 p.m. y 7:00 p.m.

Este modelo da como resultado 97 corridas en total, lo que indica que este es el más óptimo para la obtención de la información que se desea del experimento DOE en el proceso de tratamiento térmico por inducción de la compañía Integrando LTDA.

## 6.5 Diseño factorial en Minitab para modelo seleccionado

Con el modelo seleccionado se llevan estos datos al software Minitab, herramienta de apoyo para el análisis estadístico del diseño de experimentos. Minitab permite crear el diseño factorial siempre y cuando se tengan claras las variables, rangos, niveles, puntos centrales, bloques y demás que intervengan con el proceso que es caso de estudio.

En la tabla 3 se muestra las 97 corridas del modelo de seleccionado; dicho modelo al ser ingresado en el software Minitab genera cada corrida siendo esta una combinación de factores de acuerdo a los rangos seleccionados de cada uno. La columna *Orden Corrida* es la aleatorización que realiza dicho software y que es una de las reglas que presenta el diseño de experimentos para poder llevar a cabalidad este.

Tabla 3. Lista de corridas (muestras en proceso de tratamiento térmico) según software Minitab.

Orden Est	Orden Corrida	Punto Central	Bloques	grados brix	temperatura chiller	presión flautas	potencia bobina	tiempo exposición	diametro	tipo A. A
17	17	1	1	4	13	50	28	28	195,3	1
1	1	1	1	4	13	50	28	20	195,3	3
21	21	1	1	4	13	90	28	28	175,6	1
5	5	1	1	4	13	90	28	20	175,6	3
9	9	1	1	4	13	50	32	20	175,6	1
25	25	1	1	4	13	50	32	28	175,6	3
13	13	1	1	4	13	90	32	20	195,3	1
29	29	1	1	4	13	90	32	28	195,3	3
3	3	1	1	4	18	50	28	20	175,6	1
19	19	1	1	4	18	50	28	28	175,6	3
7	7	1	1	4	18	90	28	20	195,3	1
23	23	1	1	4	18	90	28	28	195,3	3
27	27	1	1	4	18	50	32	28	195,3	1
11	11	1	1	4	18	50	32	20	195,3	3
31	31	1	1	4	18	90	32	28	175,6	1
15	15	1	1	4	18	90	32	20	175,6	3
33	33	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2
34	34	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2
35	35	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4	2



									5	
36	36	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
37	37	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
38	38	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
39	39	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
40	40	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
41	41	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
42	42	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
43	43	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
44	44	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
45	45	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
46	46	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
47	47	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
48	48	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
2	2	1	1	5	13	50	28	20	175,6	1
18	18	1	1	5	13	50	28	28	175,6	3
6	6	1	1	5	13	90	28	20	195,3	1
22	22	1	1	5	13	90	28	28	195,3	3
26	26	1	1	5	13	50	32	28	195,3	1
10	10	1	1	5	13	50	32	20	195,3	3
30	30	1	1	5	13	90	32	28	175,6	1
14	14	1	1	5	13	90	32	20	175,6	3
20	20	1	1	5	18	50	28	28	195,3	1
4	4	1	1	5	18	50	28	20	195,3	3
24	24	1	1	5	18	90	28	28	175,6	1
8	8	1	1	5	18	90	28	20	175,6	3
12	12	1	1	5	18	50	32	20	175,6	1
28	28	1	1	5	18	50	32	28	175,6	3
16	16	1	1	5	18	90	32	20	195,3	1
32	32	1	1	5	18	90	32	28	195,3	3
65	65	1	2	4	13	50	28	28	195,3	1

49	49	1	2	4	13	50	28	20	195,3	3
69	69	1	2	4	13	90	28	28	175,6	1
53	53	1	2	4	13	90	28	20	175,6	3
57	57	1	2	4	13	50	32	20	175,6	1
73	73	1	2	4	13	50	32	28	175,6	3
61	61	1	2	4	13	90	32	20	195,3	1
77	77	1	2	4	13	90	32	28	195,3	3
51	51	1	2	4	18	50	28	20	175,6	1
67	67	1	2	4	18	50	28	28	175,6	3
55	55	1	2	4	18	90	28	20	195,3	1
71	71	1	2	4	18	90	28	28	195,3	3
75	75	1	2	4	18	50	32	28	195,3	1
59	59	1	2	4	18	50	32	20	195,3	3
79	79	1	2	4	18	90	32	28	175,6	1
63	63	1	2	4	18	90	32	20	175,6	3
81	81	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
82	82	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
83	83	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
84	84	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
85	85	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
97	97	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
86	86	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
87	87	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
88	88	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
89	89	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
90	90	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
91	91	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
92	92	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
93	93	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
94	94	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2

95	95	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
96	96	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,4 5	2
50	50	1	2	5	13	50	28	20	175,6	1
66	66	1	2	5	13	50	28	28	175,6	3
54	54	1	2	5	13	90	28	20	195,3	1
70	70	1	2	5	13	90	28	28	195,3	3
74	74	1	2	5	13	50	32	28	195,3	1
58	58	1	2	5	13	50	32	20	195,3	3
78	78	1	2	5	13	90	32	28	175,6	1
62	62	1	2	5	13	90	32	20	175,6	3
68	68	1	2	5	18	50	28	28	195,3	1
52	52	1	2	5	18	50	28	20	195,3	3
72	72	1	2	5	18	90	28	28	175,6	1
56	56	1	2	5	18	90	28	20	175,6	3
60	60	1	2	5	18	50	32	20	175,6	1
76	76	1	2	5	18	50	32	28	175,6	3
64	64	1	2	5	18	90	32	20	195,3	1
80	80	1	2	5	18	90	32	28	195,3	3

Fuente. Software Minitab 15

### 6.5.1 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE

Luego de las corridas aleatorias arrojadas por Minitab se requiere para llevar a cabo el experimento fabricar piñones con las siguientes características presentadas en la tabla 4:

Tabla 4. Planeación para la fabricación de las muestras para el diseño de experimentos DOE.

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL(m m)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO
Referencia DOE 1	1(AX)	56	175,6	16	10
Referencia DOE 2	3(BEST)	56	175,6	16	10
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2(RX)</b>	<b>56</b>	<b>185,5</b>	<b>33</b>	<b>10</b>
Referencia DOE 4	1(AX)	56	195,3	16	10
Referencia DOE 5	3(BEST)	56	195,3	16	10

Fuente. Departamento de planeación y programación de la producción Integrando LTDA.

Dado que es una prueba destructiva se requieren en total 97 unidades contempladas en 5 referencias distintas por sus especificaciones. Cabe notar que en el diseño de experimentos se determinó como variable de ruido el turno de trabajo, por ende las primeras 49 corridas como lo muestra la tabla 4 se realizan en el turno 1 de la mañana en el horario de 9:00 a.m. y 12:00 p.m.. Para el caso de las 48 corridas restantes se realizan en los horarios de 4:00 p.m. y 7:00 p.m.

En la tabla 4 la referencia resaltada en color rojo hace alusión a los puntos centrales generados en el modelo que permitirán observar fácilmente si existe curvatura en este. En total para el modelo planteado se requieren 33 unidades con las especificaciones dadas y estas unidades se repartirán equitativamente en los 2 bloques ya seleccionados. El área de planeación y programación de la producción

de Integrando LTDA., genero la siguiente programación luego de planear los recursos necesarios para la fabricación de los piñones, esta programación se evidencia en la tabla 5.

Tabla 5. Planeación y programación de las muestras para el diseño de experimentos DOE.

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL(mm)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO	OP (ORDEN DE PRODUCCION)	TIEMPO
Referencia DOE 1	1(AX)	56	175,6	16	10	118LU	2 HORAS
Referencia DOE 2	3(BEST)	56	175,6	16	10	119LU	2 HORAS
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2(RX)</b>	<b>56</b>	<b>185,5</b>	<b>33</b>	<b>10</b>	<b>120LU</b>	<b>4 HORAS</b>
Referencia DOE 4	1(AX)	56	195,3	16	10	121LU	2 HORAS
Referencia DOE 5	3(BEST)	56	195,3	16	10	122LU	2 HORAS

Fuente. Departamento de planeación y programación de la producción Integrando LTDA.

En la figura 21 se observa los piñones ya fabricados y llevados hasta el proceso de tratamiento térmico siguiendo la secuencia de procesos establecida por la compañía y documentada en el sistema de gestión de calidad. Se evidencia que son 5 estibas las cuales están identificadas con la Orden de producción que género el depto. De planeación y programación de la producción, estas unidades cumplen con las especificaciones dadas y están aprobadas por el dpto. De calidad para la realización del experimento cumpliendo a cabalidad con las especificaciones que se determinaron anteriormente.

Figura 21. Imagen de los piñones que se fabricaron para el experimento en proceso de tratamiento térmico.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

Para la aplicación del diseño de experimentos se contará con el personal experto del proceso de tratamiento térmico por inducción de Integrando LTDA., además los cuales serán de apoyo ya que las variables que inciden en el proceso se encuentran cerca o un poco retirado de la máquina, por consiguiente y por la aleatorización del modelo generado por Minitab se estarán modificando las diferentes variables de acuerdo a la tabla 5 e interactuando con la máquina para conocer cómo reacciona a estas condiciones dadas teniendo en cuenta que la variable de respuesta es la dureza Rockwell C (HRC) la cual debe de garantizarse en todo el perímetro del piñón.

Como dato adicional al estudio se tomara la temperatura con el dispositivo que se muestra en figura 22, el cual permite visualizar la temperatura °C que alcanza la pieza dentro de la bobina de inducción. Este dispositivo cuenta con un láser que sirve de guía para que este tome como referencia dicho punto y arroje el valor que se desea verificar.

Figura 22. Toma de temperatura con dispositivo refractómetro.



Fuente. Foto investigador planta de producción Integrando LTDA.

#### 6.5.2 Aplicación del DOE en proceso de tratamiento térmico por inducción

Teniendo en cuenta el diseño factorial generado por el software Minitab que se muestra en la tabla 3 se aplica al proceso de tratamiento térmico teniendo como variable de respuesta la dureza Rockwell C (HRC); se parametrizan cada una de las variables según los valores que arroja cada corrida y se toma el dato de la dureza como se muestra en la tabla 6, adicional a esto se toma el dato de la temperatura °C que alcanza el piñón mientras este se calienta dentro de la bobina de inducción.

Tabla 6. Listado de corridas con su respectiva toma de dureza y temperatura del diseño de experimentos en proceso de tratamiento térmico.

OrdenEst	OrdenCorrida	PuntoCentral	Bloques	grados brix	temperatura chiller	presión flautas	potencia bobina	tiempo exposición	diámetro	tipo A. A	dureza	temperatura	observación
17	17	1	1	4,0	13,0	50	28	28	195,30	1	63,75	800	
1	1	1	1	4,0	13,0	50	28	20	195,30	3	31,25	423	
21	21	1	1	4,0	13,0	90	28	28	175,60	1	63,75	770	FISURA
5	5	1	1	4,0	13,0	90	28	20	175,60	3	33,75	424	
9	9	1	1	4,0	13,0	50	32	20	175,60	1	61,25	850	
25	25	1	1	4,0	13,0	50	32	28	175,60	3	55,00	651	
13	13	1	1	4,0	13,0	90	32	20	195,30	1	62,50	640	
29	29	1	1	4,0	13,0	90	32	28	195,30	3	65,00	687	
3	3	1	1	4,0	18,0	50	28	20	175,60	1	61,25	437	
19	19	1	1	4,0	18,0	50	28	28	175,60	3	53,75	610	
7	7	1	1	4,0	18,0	90	28	20	195,30	1	41,25	615	
23	23	1	1	4,0	18,0	90	28	28	195,30	3	56,25	644	
27	27	1	1	4,0	18,0	50	32	28	195,30	1	65,00	850	
11	11	1	1	4,0	18,0	50	32	20	195,30	3	31,25	520	
31	31	1	1	4,0	18,0	90	32	28	175,60	1	62,50	880	FISURA
15	15	1	1	4,0	18,0	90	32	20	175,60	3	27,50	410	
33	33	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	28,75	514	
34	34	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	33,75	509	
35	35	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	58,75	588	
36	36	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	36,25	527	
37	37	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	38,75	547	
97	97	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	45,15	560	
38	38	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	45,00	572	
39	39	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	51,25	591	
40	40	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	52,50	564	
41	41	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	61,45	518	
42	42	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	36,25	545	
43	43	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	43,75	554	
44	44	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	42,50	549	
45	45	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	46,25	548	
46	46	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	48,75	512	
47	47	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	47,50	560	
48	48	0	1	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	58,75	548	
2	2	1	1	5,0	13,0	50	28	20	175,60	1	36,25	540	



18	18	1	1	5,0	13,0	50	28	28	175,60	3	48,75	595	
6	6	1	1	5,0	13,0	90	28	20	195,30	1	45,00	596	
22	22	1	1	5,0	13,0	90	28	28	195,30	3	52,50	590	
26	26	1	1	5,0	13,0	50	32	28	195,30	1	61,25	848	
10	10	1	1	5,0	13,0	50	32	20	195,30	3	33,75	516	
30	30	1	1	5,0	13,0	90	32	28	175,60	1	55,00	659	FISUR A
14	14	1	1	5,0	13,0	90	32	20	175,60	3	28,75	517	
20	20	1	1	5,0	18,0	50	28	28	195,30	1	62,50	733	
4	4	1	1	5,0	18,0	50	28	20	195,30	3	27,50	433	
24	24	1	1	5,0	18,0	90	28	28	175,60	1	62,50	727	FISUR A
8	8	1	1	5,0	18,0	90	28	20	175,60	3	28,75	423	
12	12	1	1	5,0	18,0	50	32	20	175,60	1	57,50	696	
28	28	1	1	5,0	18,0	50	32	28	175,60	3	40,00	640	
16	16	1	1	5,0	18,0	90	32	20	195,30	1	61,25	608	
32	32	1	1	5,0	18,0	90	32	28	195,30	3	65,00	725	
65	65	1	2	4,0	13,0	50	28	28	195,30	1	60,00	693	
49	49	1	2	4,0	13,0	50	28	20	195,30	3	30,00	477	
69	69	1	2	4,0	13,0	90	28	28	175,60	1	61,25	772	FISUR A
53	53	1	2	4,0	13,0	90	28	20	175,60	3	21,25	368	
57	57	1	2	4,0	13,0	50	32	20	175,60	1	45,00	602	
73	73	1	2	4,0	13,0	50	32	28	175,60	3	48,75	659	
61	61	1	2	4,0	13,0	90	32	20	195,30	1	43,75	619	
77	77	1	2	4,0	13,0	90	32	28	195,30	3	55,00	683	
51	51	1	2	4,0	18,0	50	28	20	175,60	1	58,75	633	
67	67	1	2	4,0	18,0	50	28	28	175,60	3	51,25	619	
55	55	1	2	4,0	18,0	90	28	20	195,30	1	41,25	557	
71	71	1	2	4,0	18,0	90	28	28	195,30	3	53,75	556	
75	75	1	2	4,0	18,0	50	32	28	195,30	1	61,25	623	
59	59	1	2	4,0	18,0	50	32	20	195,30	3	32,50	486	
79	79	1	2	4,0	18,0	90	32	28	175,60	1	63,75	653	FISUR A
63	63	1	2	4,0	18,0	90	32	20	175,60	3	31,25	451	
81	81	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	53,75	621	
82	82	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	47,50	569	
83	83	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	52,50	568	
84	84	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	42,50	576	
85	85	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	31,25	578	
86	86	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	40,00	596	
87	87	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	48,75	576	
88	88	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	46,25	605	

89	89	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	45,00	574	
90	90	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	45,00	583	
91	91	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	47,50	611	
92	92	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	36,25	564	
93	93	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	30,00	584	
94	94	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	28,75	599	
95	95	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	46,25	583	
96	96	0	2	4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	31,25	566	
50	50	1	2	5,0	13,0	50	28	20	175,60	1	53,75	560	
66	66	1	2	5,0	13,0	50	28	28	175,60	3	37,50	573	
54	54	1	2	5,0	13,0	90	28	20	195,30	1	47,50	568	
70	70	1	2	5,0	13,0	90	28	28	195,30	3	56,25	564	
74	74	1	2	5,0	13,0	50	32	28	195,30	1	58,75	812	
58	58	1	2	5,0	13,0	50	32	20	195,30	3	22,50	463	
78	78	1	2	5,0	13,0	90	32	28	175,60	1	65,00	568	FISUR A
62	62	1	2	5,0	13,0	90	32	20	175,60	3	23,75	416	
68	68	1	2	5,0	18,0	50	28	28	195,30	1	62,50	729	
52	52	1	2	5,0	18,0	50	28	20	195,30	3	28,75	450	
72	72	1	2	5,0	18,0	90	28	28	175,60	1	60,00	760	
56	56	1	2	5,0	18,0	90	28	20	175,60	3	26,25	359	
60	60	1	2	5,0	18,0	50	32	20	175,60	1	41,25	649	
76	76	1	2	5,0	18,0	50	32	28	175,60	3	55,00	696	
64	64	1	2	5,0	18,0	90	32	20	195,30	1	56,25	637	
80	80	1	2	5,0	18,0	90	32	28	195,30	3	37,50	727	

Fuente. Proceso de tratamiento térmico en planta de producción Integrando LTDA.

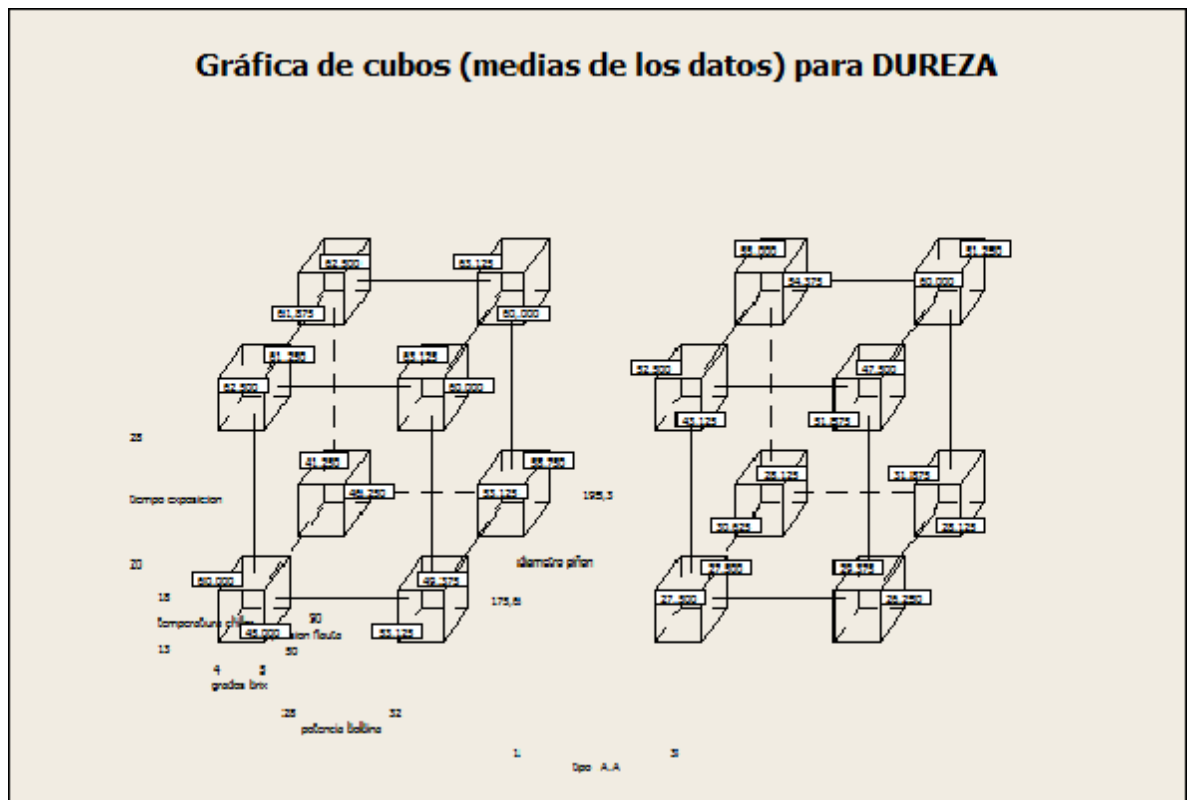
Se evidencia que durante la aplicación del experimento DOE lo que son las corridas 78, 79, 69, 24, 30, 31 y 21 presentaron fisura del material cuando este supero la etapa plástica, sin embargo se tomaron los valores de dureza de estos para efectos del experimento. Para el resto de corridas no se presentó fisura del material y también se tomó el valor de dureza. La aplicación del experimento se realizó en dos fases debido a los bloques previamente establecidos y que por consiguiente para que el ejercicio tenga el nivel de confianza deseado se respetó el horario que se estableció en dichos bloques.

Con respecto a la modificación y fijación de cada una de las variables presentes en el experimento no se reportaron novedades y fue posible llevar al valor deseado según cada corrida, sin embargo fue necesario contar con el personal experto debido a que dichas variables se encuentran dentro de diferentes mecanismos que requerían de un conocimiento claro de cómo opera para no afectar condiciones estándar las cuales son establecidas por el proveedor de la

máquina, ya que este dependiendo del uso y la necesidad del cliente determina dichas condiciones. Los piñones se fabricaron de acuerdo a las especificaciones previamente establecidas, esto piñones se fabricaron teniendo en cuenta la secuencia de los procesos establecida por el departamento de producción de la compañía y se llevaron hasta el proceso de tratamiento térmico para una vez se dispuso de la maquina poder realizar el experimento; los piñones una vez tomada su dureza, se destinaron a una zona de cuarentena para su posterior desecho y dada de baja en el lote de producción por efectos de inventario.

## 6.6 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION

Figura 23. Gráfica de cubos de diseño de experimentos en software Minitab para variable de respuesta DUREZA.



Fuente. Software Minitab 15.

Se pasan estos datos recopilados de la tabla 6 al proyecto creado en software Minitab garantizando aleatoriedad en cuanto a las corridas, se genera el campo para consignar el valor de la dureza Rockwell C (HRC), la cual se determinó como variable de respuesta del modelo y que dentro de la configuración de los campos para el análisis del diseño factorial se requiere incluir para observar los efectos de los diferentes factores sobre esta.

### 6.6.1 Análisis de Pareto de efectos para *DUREZA ROCKWELL C (HRC)*

#### Efectos Pareto para DUREZA

Estructura de alias (hasta el orden 3)

|

Bloques =

grados brix

temperatura chiller

presión flauta + tiempo exposición\*diámetro piñón\*tipo A.A

potencia bobina

tiempo exposición + presión flauta\*diámetro piñón\*tipo A.A

Diámetro piñón + presión flauta\*tiempo exposición\*tipo A.A

Tipo A.A + presión flauta\*tiempo exposición\*diámetro piñón

Grados brix\*temperatura chiller + presión flauta\*potencia bobina\*diámetro piñón  
+ potencia bobina\*tiempo exposición\*tipo A.A

Grados brix\*presión flauta + temperatura chiller\*potencia bobina\*diámetro piñón

grados brix\*potencia bobina + temperatura chiller\*presión flauta\*diámetro piñón  
+ temperatura chiller\*tiempo exposición\*tipo A.A

grados brix\*tiempo exposición + temperatura chiller\*potencia bobina\*tipo A.A

grados brix\*diámetro piñón + temperatura chiller\*presión flauta\*potencia bobina

grados brix\*tipo A.A + temperatura chiller\*potencia bobina\*tiempo exposición

temperatura chiller\*presión flauta + grados brix\*potencia bobina\*diámetro piñón

temperatura chiller\*potencia bobina + grados brix\*presión flauta\*diámetro piñón  
+ grados brix\*tiempo exposición\*tipo A.A

temperatura chiller\*tiempo exposición + grados brix\*potencia bobina\*tipo A.A

temperatura chiller\*diámetro piñón + grados brix\*presión flauta\*potencia bobina

temperatura chiller\*tipo A.A + grados brix\*potencia bobina\*tiempo exposición

presión flauta\*potencia bobina + grados brix\*temperatura chiller\*diámetro piñón

presión flauta\*tiempo exposición + diámetro piñón\*tipo A.A

presión flauta\*diámetro piñón + tiempo exposición\*tipo A.A + grados

brix\*temperatura chiller\*potencia bobina

presión flauta\*tipo A.A + tiempo exposición\*diámetro piñón

potencia bobina\*tiempo exposición + grados brix\*temperatura chiller\*tipo A.A

potencia bobina\*diámetro piñón + grados brix\*temperatura chiller\*presión flauta

potencia bobina\*tipo A.A + grados brix\*temperatura chiller\*tiempo exposición

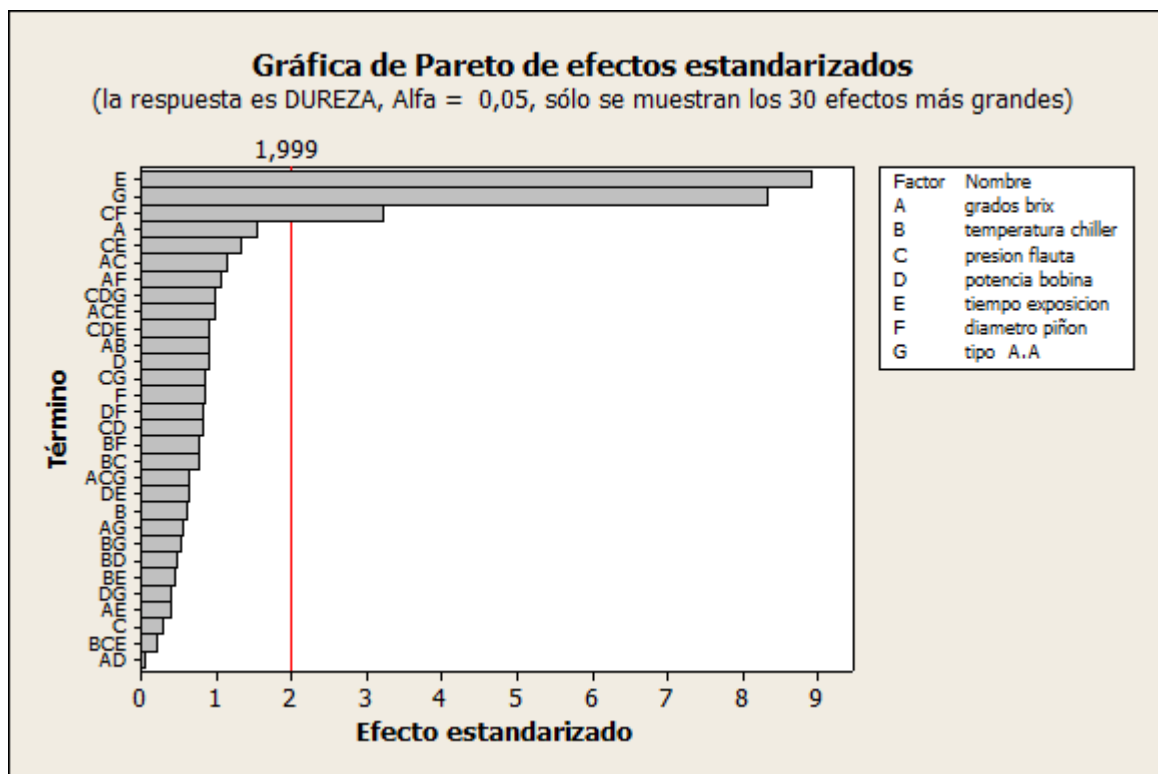
grados brix\*presión flauta\*tiempo exposición + grados brix\*diámetro piñón\*tipo  
A.A

grados brix\*presión flauta\*tipo A.A + grados brix\*tiempo exposición\*diámetro  
piñón

temperatura chiller\*presión flauta\*tiempo exposición + temperatura  
chiller\*diámetro piñón\*tipo A.A

temperatura chiller\*presión flauta\*tipo A.A + temperatura chiller\*tiempo  
 exposición\*diámetro piñón  
 presión flauta\*potencia bobina\*tiempo exposición + potencia bobina\*diámetro  
 piñón\*tipo A.A  
 presión flauta\*potencia bobina\*tipo A.A + potencia bobina\*tiempo  
 Exposición\*diámetro piñón

Figura 24. Gráfica de pareto de efectos estandarizados en diseño de experimentos DOE.



Fuente. Software Minitab 15

En la figura 24 se evidencia que las factores que más inciden en la variable de repuesta son la E (tiempo de exposición), G (tipo agujero de alivio); superando  $\alpha = 0,05$  codificado. Además se observa una interacción de los factores C (presión flauta), F (diámetro de piñón), la cual también incide ya que supera  $\alpha = 0,05$ .

## 6.6.2 Principio de confusión del modelo

### Diseño factorial fraccionado

Factores: 7    Diseño Base:                      7. 32    Resolución con bloques: IV  
Corridas: 97    Réplicas:                      2    Fracción:                      1/4  
Bloques: 2    Puntos centrales (total): 33

Generadores del diseño:  $F = ABCD$ .  $G = ABDE$

Generadores de bloques: réplicas

Estructura de alias

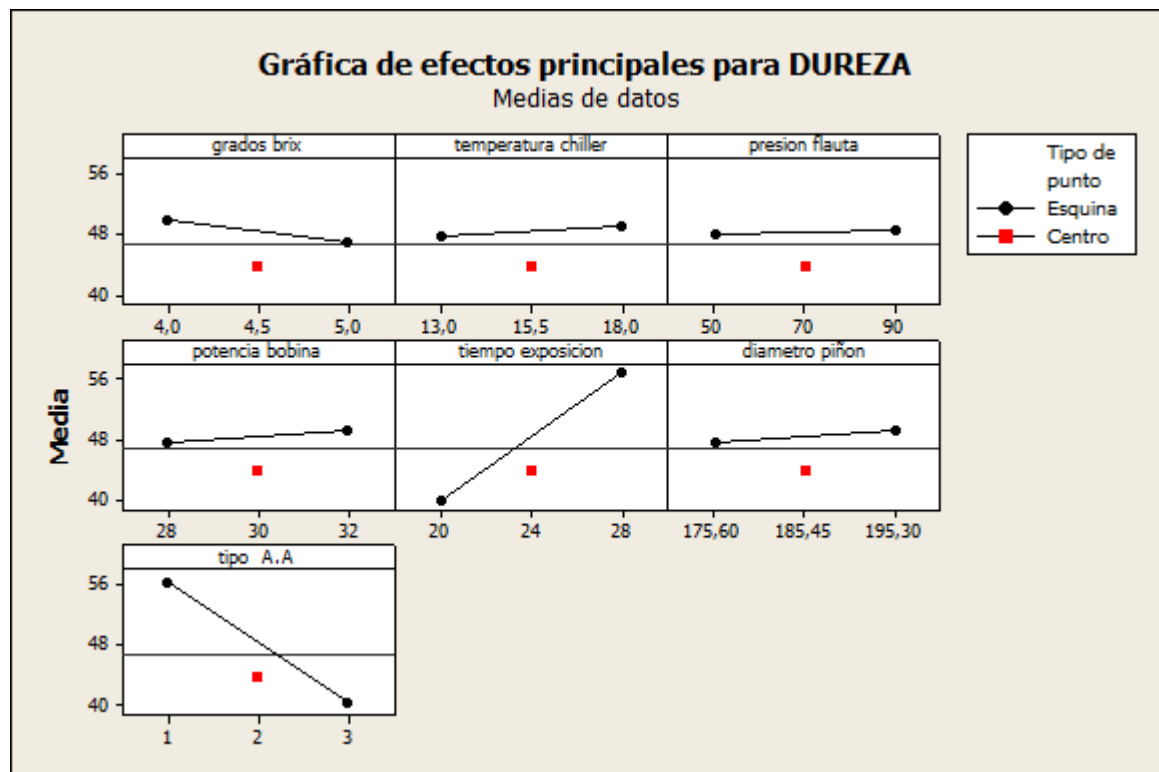
$I + CEFG + ABCDF + ABDEG$

$A + BCDF + BDEG + ACEFG$   
 $B + ACDF + ADEG + BCEFG$   
 $C + EFG + ABDF + ABCDEG$   
 $D + ABCF + ABEG + CDEFG$   
 $E + CFG + ABDG + ABCDEF$   
 $F + CEG + ABCD + ABDEFG$   
 $G + CEF + ABDE + ABCDFG$   
 $AB + CDF + DEG + ABCEFG$   
 $AC + BDF + AEFG + BCDEG$   
 $AD + BCF + BEG + ACDEFG$   
 $AE + BDG + ACFG + BCDEF$   
 $AF + BCD + ACEG + BDEFG$   
 $AG + BDE + ACEF + BCDFG$   
 $BC + ADF + BEFG + ACDEG$   
 $BD + ACF + AEG + BCDEFG$   
 $BE + ADG + BCFG + ACDEF$   
 $BF + ACD + BCEG + ADEFG$   
 $BG + ADE + BCEF + ACDFG$   
 $CD + ABF + DEFG + ABCEG$   
 $CE + FG + ABCDG + ABDEF$   
 $CF + EG + ABD + ABCDEFG$   
 $CG + EF + ABCDE + ABDFG$   
 $DE + ABG + CDFG + ABCEF$   
 $DF + ABC + CDEG + ABIEFG$

DG + ABE + CDEF + ABCFG  
 ACE + AFG + BCDG + BDEF  
 ACG + AEF + BCDE + BDFG  
 BCE + BFG + ACDG + ADEF  
 BCG + BEF + ACDE + ADFG  
 CDE + DFG + ABCG + ABEF  
 CDG + DEF + ABCE + ABFG

En la figura 24 se genera una confusión con la interacción CF ya que superan  $\alpha = 1,999$  descodificado; sin embargo como se muestra en la figura 25 se observa que estos factores analizados independientemente no tienen incidencia en el modelo por consiguiente son factores que se fijaran una vez se aplique el *full factorial*.

Figura 25. Gráfica de efectos principales de diseño de experimentos para variable de respuesta DUREZA.



Fuente. Software Minitab 15.

Para el caso de C (presión flauta), la pendiente es muy leve por consiguiente gráficamente se concluye que este factor no incide en la variable de respuesta.



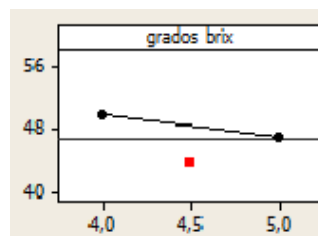
Para F (diámetro piñón) la pendiente es muy leve por consiguiente también se determina que no tiene incidencia en la variable de respuesta.

### 6.6.3 Análisis de efectos principales para *DUREZA ROCKWELL C (HRC)*

A continuación se hace análisis gráfico de cada efecto principal del modelo factorial fraccionado que se ilustra en la figura 25.

#### 6.6.3.1 Análisis efecto principal *grados Brix*

Figura 26. Ilustración de la pendiente de la variable grados brix

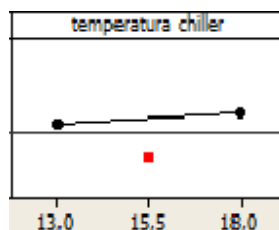


Fuente. Software Minitab 15.

Gráficamente se observa que la recta de este factor no tiene una pendiente significativa por ende no incide en la variable de respuesta *DUREZA*. El punto rojo que se observa en la figura 26 hace alusión al punto central definido por el modelo generado en el software Minitab.

#### 6.6.3.2 Análisis efecto principal *temperatura chiller*

Figura 27. Ilustración de la pendiente de la variable temperatura chiller.

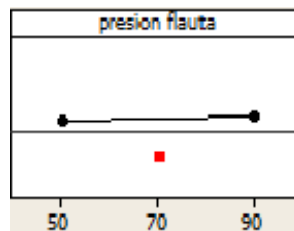


Fuente. Software Minitab 15

Gráficamente se observa que la recta no tiene una pendiente significativa por ende se determina que este factor no tiene incidencia en la variable de respuesta *DUREZA*. El punto rojo de la figura 27 hace alusión al punto central generado por el modelo construido en el software Minitab.

#### 6.6.3.3 Análisis efecto principal *presión flauta*

Figura 28. Ilustración de la pendiente de la variable presión flauta.

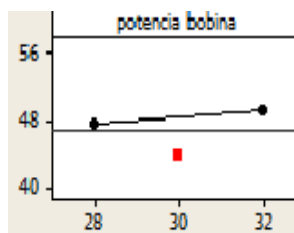


Fuente. Software Minitab 15.

Gráficamente se observa que la recta de este efecto no tiene una pendiente significativa por ende no incide en la variable de respuesta *DUREZA*. El punto rojo del figura 28 es el punto central generado por el modelo del software Minitab.

#### 6.6.3.4 Análisis efecto principal *potencia bobina*

Figura 29. Ilustración de la pendiente de la variable potencia bobina

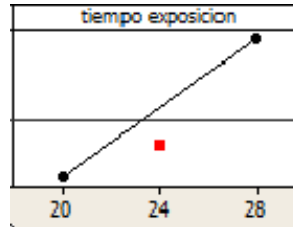


Fuente. Software Minitab 15

Gráficamente se observa que la pendiente de la recta de este factor no es significativa por ende este no incide en la variable de respuesta planteada en el modelo. El punto rojo de la figura 29 se refiere al punto central generado por el modelo.

#### 6.6.3.5 Análisis efecto principal *tiempo exposición*

Figura 30. Ilustración de la pendiente de la variable tiempo de exposición

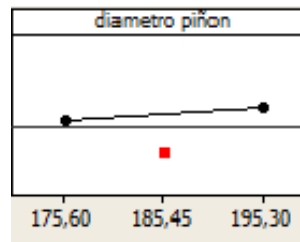


Fuente. Software Minitab 15

Gráficamente se observa que la pendiente de la recta de este factor es bastante significativa por ende este incide notablemente sobre la variable de respuesta *DUREZA*. El punto rojo de la figura 30 hace referencia al punto central generado por el modelo construido en software Minitab.

#### 6.6.3.6 Análisis efecto principal *diámetro piñón*

Figura 31. Ilustración de la pendiente de la variable diámetro de piñón.

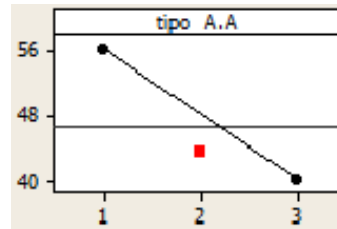


Fuente. Software Minitab 15

Gráficamente se observa que la recta tiene una pendiente poco significativa por ende este factor no incide en la variable de respuesta determinada en el modelo factorial. El punto rojo de la figura 31 hace referencia al punto central generado por el modelo de software Minitab.

#### 6.6.3.7 Análisis efecto principal *tipo agujero alivio*

Figura 32. Ilustración de la pendiente de la variable tipo agujero de alivio

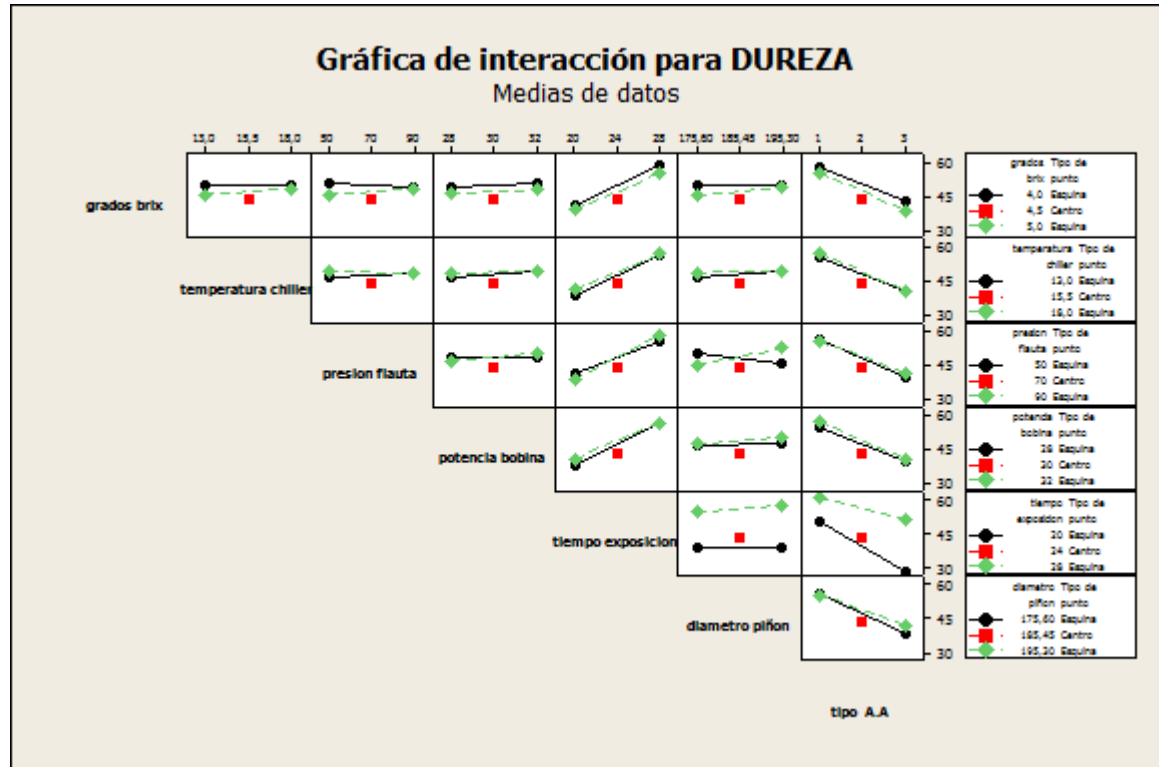


Fuente. Software Minitab 15

Gráficamente se observa que la pendiente de la recta es bastante significativa por ende se determina que este factor incide en la variable de respuesta *DUREZA*. El punto rojo de la figura 32 hace alusión al punto central que genera el modelo en software Minitab.

## 6.7 Interacciones de factores para variable de respuesta *DUREZA ROCKWELL C*

Figura 33. Gráfica de interacción para variable de respuesta DUREZA



Fuente. Software Minitab 15

Se evidencia en la figura 33 que la interacción CF, donde C (presión flauta) y F (diámetro piñón), es la más significativa estadísticamente, puesto que gráficamente las rectas se cruzan por ende se concluye que esta combinación tiene un alta incidencia sobre la variable de respuesta *DUREZA*. Sin embargo si se analizan independientemente estos factores no tienen incidencia sobre el modelo por ende y para continuar en la fase de caracterización se fijaran dichos factores en los valores que mejor rendimiento presentan para el modelo.

## 6.8 ANOVA para efectos principales que inciden en la *DUREZA ROCKWELL C*

A continuación se presenta el análisis DE LA VARIANZA CON UN FACTOR (ANOVA) que permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que una población difiere de la otra.

### Ajuste factorial: DUREZA vs. Bloque. grados brix. temperatura chil. ...

Efectos y coeficientes estimados para DUREZA (unidades codificadas)

Término	Coef.				
	Efecto	Coef	de EE	T	P
Constante		48,320	0,9587	50,40	0,000
Bloque		1,747	0,7827	2,23	0,029
Grados brix		-2,969	-1,484	0,9587	-1,55 0,127
Temperatura chiller		1,172	0,586	0,9587	0,61 0,543
Presión flauta		0,547	0,273	0,9587	0,29 0,776
Potencia bobina		1,719	0,859	0,9587	0,90 0,373
Tiempo exposición		17,109	8,555	0,9587	8,92 0,000
Diámetro piñón		1,641	0,820	0,9587	0,86 0,395
Tipo A.A		-16,016	-8,008	0,9587	-8,35 0,000
Grados brix*temperatura chiller		1,719	0,859	0,9587	0,90 0,373
Grados brix*presión flauta		2,187	1,094	0,9587	1,14 0,258
Grados brix*potencia bobina		-0,078	-0,039	0,9587	-0,04 0,968
Grados brix*tiempo exposición		-0,781	-0,391	0,9587	-0,41 0,685
Grados brix*diámetro piñón		2,031	1,016	0,9587	1,06 0,294
Grados brix*tipo A.A		-1,094	-0,547	0,9587	-0,57 0,570
Temperatura chiller*presión flauta		-1,484	-0,742	0,9587	-0,77 0,442
Temperatura chiller*potencia bobina		-0,938	-0,469	0,9587	-0,49 0,627
Temperatura chiller* Tiempo exposición		-0,859	-0,430	0,9587	-0,45 0,656
Temperatura chiller*diámetro piñón		-1,484	-0,742	0,9587	-0,77 0,442
Temperatura chiller*tipo A.A		-1,016	-0,508	0,9587	-0,53 0,598
Presión flauta*potencia bobina		1,562	0,781	0,9587	0,81 0,418
Presión flauta*tiempo exposición		2,578	1,289	0,9587	1,34 0,184
Presión flauta*diámetro piñón		6,172	3,086	0,9587	3,22 0,002
Presión flauta*tipo A.A		1,641	0,820	0,9587	0,86 0,395
Potencia bobina*tiempo exposición		-1,250	-0,625	0,9587	-0,65 0,517
Potencia bobina*diámetro piñón		1,562	0,781	0,9587	0,81 0,418
Potencia bobina*tipo A.A		-0,781	-0,391	0,9587	-0,41 0,685
Grados brix*presión flauta*		-1,875	-0,937	0,9587	-0,98 0,332
Tiempo exposición					
Grados brix*presión flauta*tipo A.A		-1,250	-0,625	0,9587	-0,65 0,517
Temperatura chiller*presión flauta*		-0,391	-0,195	0,9587	-0,20 0,839
Tiempo exposición					
Temperatura chiller*presión flauta*		0,078	0,039	0,9587	0,04 0,968

Tipo A.A					
Presión flauta*potencia bobina*	-1,719	-0,859	0,9587	-0,90	0,373
Tiempo exposición					
Presión flauta*potencia bobina*	-1,875	-0,937	0,9587	-0,98	0,332
Tipo A.A					
Ct Pt	-4,486	1,6604	-2,70	0,009	

S = 7,66924      PRESS = 8576,48  
R-cuad. = 75,37%   R-cuad.(pred.) = 42,07%   R-cuad.(ajustado) = 62,26%

.

El modelo presenta un  $R^2$ (ajustado) de 62,26%, este hace alusión al coeficiente de determinación, que significa que el modelo que tiene variable de respuesta la dureza esta explicado en un 62,26% por los factores y sus efectos sobre esta. Por consiguiente es un porcentaje el cual es confiable y permite obtener información significativa para la toma de decisiones sobre el proceso, por ende dando solución al problema planteado.

Según ANOVA los efectos principales y las interacciones de estos que tiene incidencia sobre la variable de respuesta y que son significativas por el aporte sobre esta son:

- El tiempo de exposición con un efecto codificado de 17,109
- Tipo de agujero de alivio con un efecto codificado de -16,016
- Interacción (presión flauta\*diámetro piñón) con un efecto codificado de 6,172

Esto debido a que el valor P, que permite estadísticamente determinar si cada factor e interacción incide sobre la variable de respuesta es para cada una de las anteriores  $P < 0,05$  lo que se concluye que tiene gran significancia sobre la variable de respuesta *DUREZA ROCKWEL C*. Para el caso de los demás efectos e interacciones se concluye que no tienen incidencia en el modelo, ya que no son significativas para la variable de respuesta soportada por el valor P el cual es  $P > 0,05$  que se evidencia en los datos arrojados por Minitab 15.

Aquí se observa entonces la comparación de estimaciones de la varianza para cada recurso de variación. Lo que provee una evaluación de significancia estadística para cada recurso de variación. Esto a que ANOVA compara la variación entre los niveles y dentro de un nivel dado.

### 6.8.1 Análisis bloques y puntos centrales del modelo factorial fraccionado para *DUREZA ROCKWELL C*

#### Análisis de varianza para DUREZA (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Bloques	1	293,0	293,0	292,95	4,98
Efectos principales	7	9045,8	9045,8	1292,26	21,97
2-Interacciones de (No.) factores	18	1203,5	1203,5	66,86	1,14
3-Interacciones de (No.) factores	6	187,3	187,3	31,22	0,53
Curvatura	1	429,3	429,3	429,30	7,30
Error residual	62	3646,7	3646,7	58,82	
Falta de ajuste	32	1300,2	1300,2	40,63	0,52
Error puro	30	2346,5	2346,5	78,22	
Total	95	14805,6			

Fuente	P
Bloques	0,029
Efectos principales	0,000
2-Interacciones de (No.) factores	0,341
3-Interacciones de (No.) factores	0,783
Curvatura	0,009
Error residual	
Falta de ajuste	0,964
Error puro	
Total	

El análisis del modelo generado por Minitab permite evidenciar que los bloques o factores de ruido no controlables inciden sobre la variable de respuesta *DUREZA*, puesto que como se observa en los resultados de Minitab el factor ruido BLOQUES que hace alusión a los turnos de trabajo tiene como valor  $P < 0,05$  lo que se concluye que este incide significativamente sobre la variable de respuesta.

Los puntos centrales permiten observar si existe curvatura en el modelo, para el caso del diseño factorial fraccionado que se aplicó en el proceso de tratamiento térmico refleja que este tiene una probabilidad un  $P < 0,05$  por ende se concluye que el modelo presenta una curvatura significativa, representándose en que este gráficamente se comporta de forma cuadrática, es decir, que su distribución en plano cartesiano está representado por una función cuadrática.



El valor F (Fisher) permite en forma general observar la cantidad de grupos estadísticos que existen en el modelo y que se reflejan en los efectos principales y las interacciones de estos efectos. La variación entre factores es mucho más grande que la variación dentro de cada factor (error, ruido), cuando el valor F es grande y cuando el valor F es pequeño la variación dentro es mayor que la variación entre los grupos estadísticos.

## 6.9 Coeficientes del diseño factorial fraccionado

A continuación se evidencia cada coeficiente para cada efecto e interacción generada en el modelo y que hace parte de la ecuación que permite obtener el mejor rendimiento que en este caso es sobre la dureza, teniendo en cuenta que no es el modelo más óptimo para la variable de respuesta *DUREZA*.

Coeficientes estimados para DUREZA utilizando datos en unidades descodificadas

Término	Coef
Constante	1082,40
Bloque	1,74688
grados brix	-99,6026
temperatura chiller	6,4878
Presión flauta	-12,9144
Potencia bobina	-16,7021
Tiempo exposición	-14,8223
Diámetro piñón	-2,66378
Tipo A.A	-65,0078
Grados brix*temperatura chiller	0,687500
Grados brix*presión flauta	0,796875
Grados brix*potencia bobina	-0,039063
Grados brix*tiempo exposición	1,44531
Grados brix*diámetro piñón	0,206218
Grados brix*tipo A.A	3,28125
Temperatura chiller*presión flauta	0,007031
Temperatura chiller*potencia bobina	-0,093750
Temperatura chiller* tiempo exposición	0,025391
Temperatura chiller*diámetro piñón	-0,0301396
Temperatura chiller*tipo A.A	-0,25781

Presión flauta*potencia bobina	0,195313
Presión flauta*tiempo exposición	0,297852
Presión flauta*diámetro piñón	0,0156647
Presión flauta*tipo A.A	1,01328
Potencia bobina*tiempo exposición	0,297852
Potencia bobina*diámetro piñón	0,0396574
Potencia bobina*tipo A.A	1,44531
Grados brix*presión flauta* tiempo exposición	-0,0234375
Grados brix*presión flauta*tipo A.A	-0,0625000
temperatura chiller*presión flauta* tiempo exposición	-0,00097656
Temperatura chiller*presión flauta* Tipo A.A	0,0007813
Presión flauta*potencia bobina* tiempo exposición	-0,00537109
Presión flauta*potencia bobina* tipo A.A	-0,0234375
Ct Pt	-4,48594

Según este análisis estadístico del modelo la ecuación descodificada que mejor representa rendimiento en la dureza es:

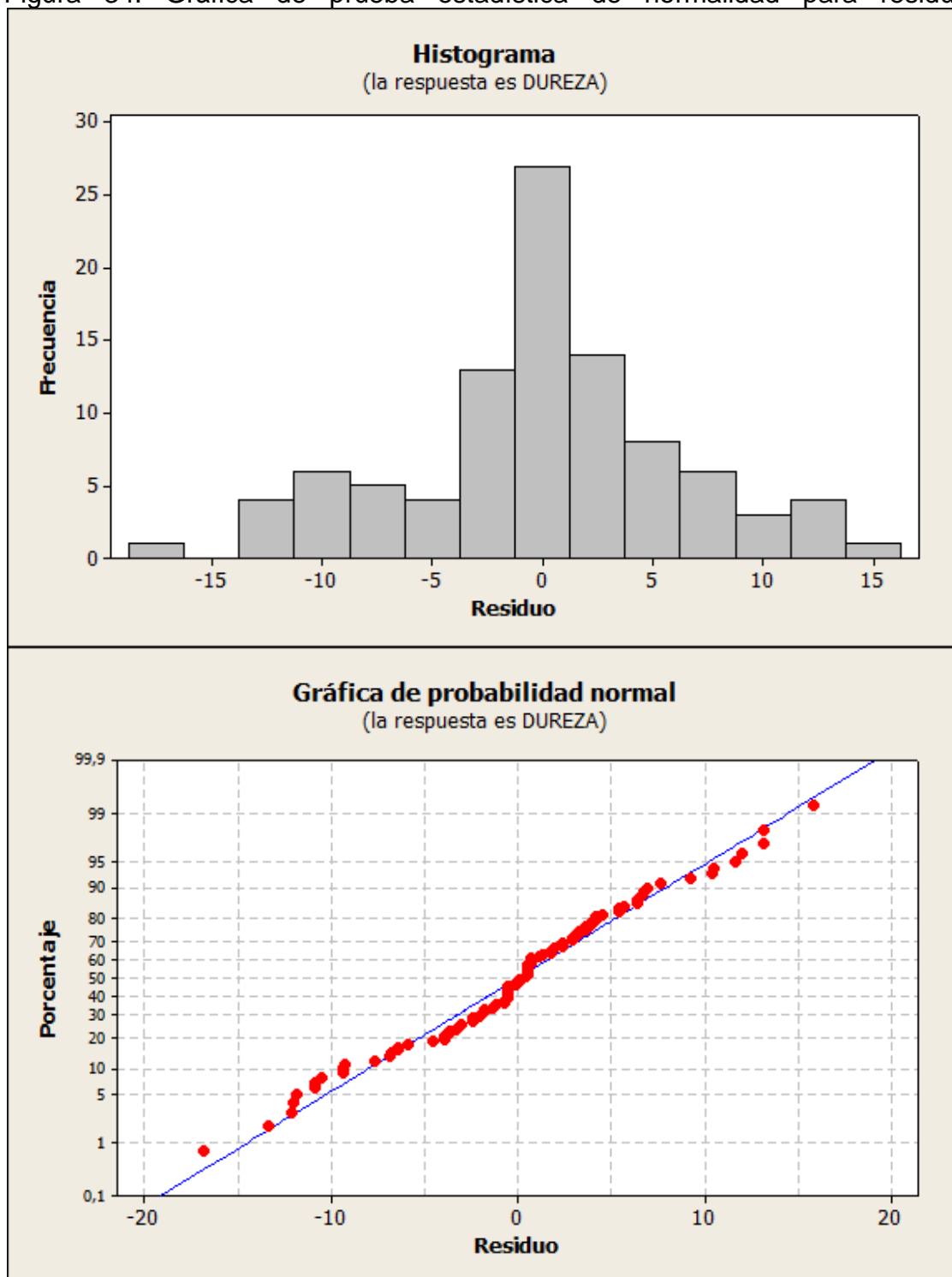
$$DUREZA = 1082,40 - 14,8223(tiempo\ exposicion) - 65,0078(tipo\ agujero\ alivio + 0,0156647(presion\ flauta * diametro\ de\ pinon))$$

#### 6.10 Análisis de residuales del DOE

Los residuales son la variación que no está explicada en los modelos de regresión, por lo tanto los residuales pueden ser entendidos como los valores del error observado en cada medición. Los análisis de residuales pueden ser una herramienta efectiva para descubrir diferentes deficiencias que pueden tener el modelo y su impacto sobre la variabilidad.

## 6.11 Probabilidad normal de los residuales

Figura 34. Gráfica de prueba estadística de normalidad para residuales.

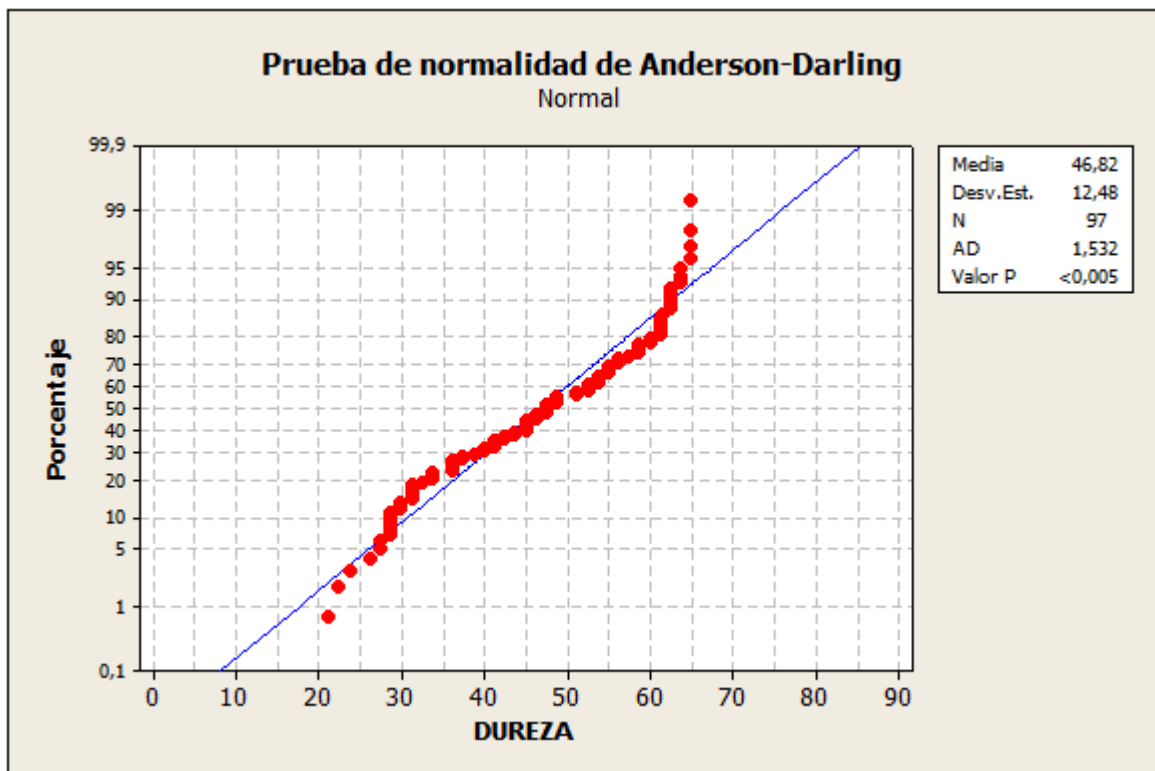


Fuente. Software Minitab 15.

La figura 34 permite evidenciar que la desviación de los datos del modelo sigue una distribución normal puesto que la forma que toman los datos es de una campana, por consiguiente gráficamente se determina que estos cumplen con criterios de normalidad. Adicional a esto se soporta con que los datos siguen una línea recta confirmando así que los datos son normales y que no existen grupos estadísticos que afecten el modelo y por lo tanto el DOE diseñado si está explicando el comportamiento que tiene la variable de respuesta.

#### 6.11.1 Comprobación estadística de prueba de normalidad de Anderson Darling

Figura 35. Prueba de normalidad de Anderson Darling



Fuente. Software Minitab 15

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

- $H_0$  = Los datos siguen una distribución exponencial
- $H_1$  = Los datos no siguen una distribución exponencial

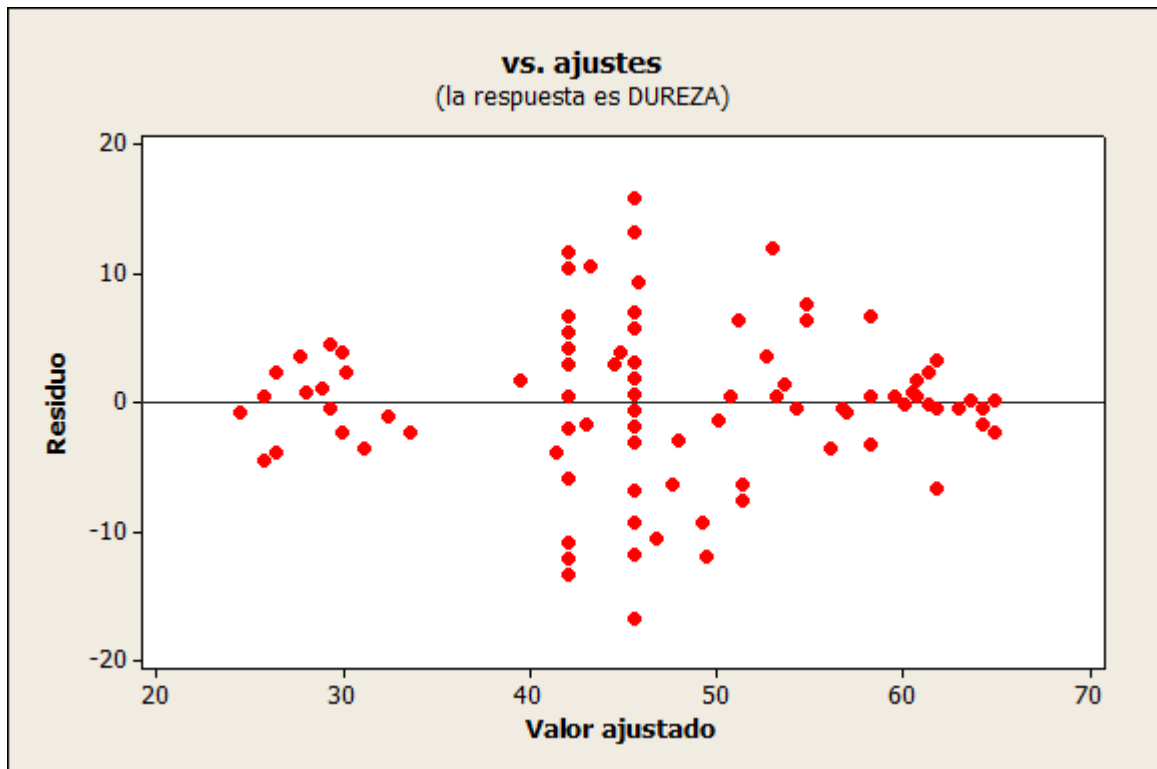
Dado que los datos presentan un valor  $P < 0,05$ , en donde el valor 0,05 se refiere al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que los datos provienen de una distribución exponencial.

## 6.12 Igualdad de varianzas

### 6.12.1 Residuales vs. Cada “valor de dureza” ajustado

Permite observar si existen deficiencias en un modelo determinado, esto teniendo en cuenta la varianza ya que se da la relación entre factores y variable para observar la correlación que existe.

Figura 36. Gráfica de residuales vs. Valor de dureza.



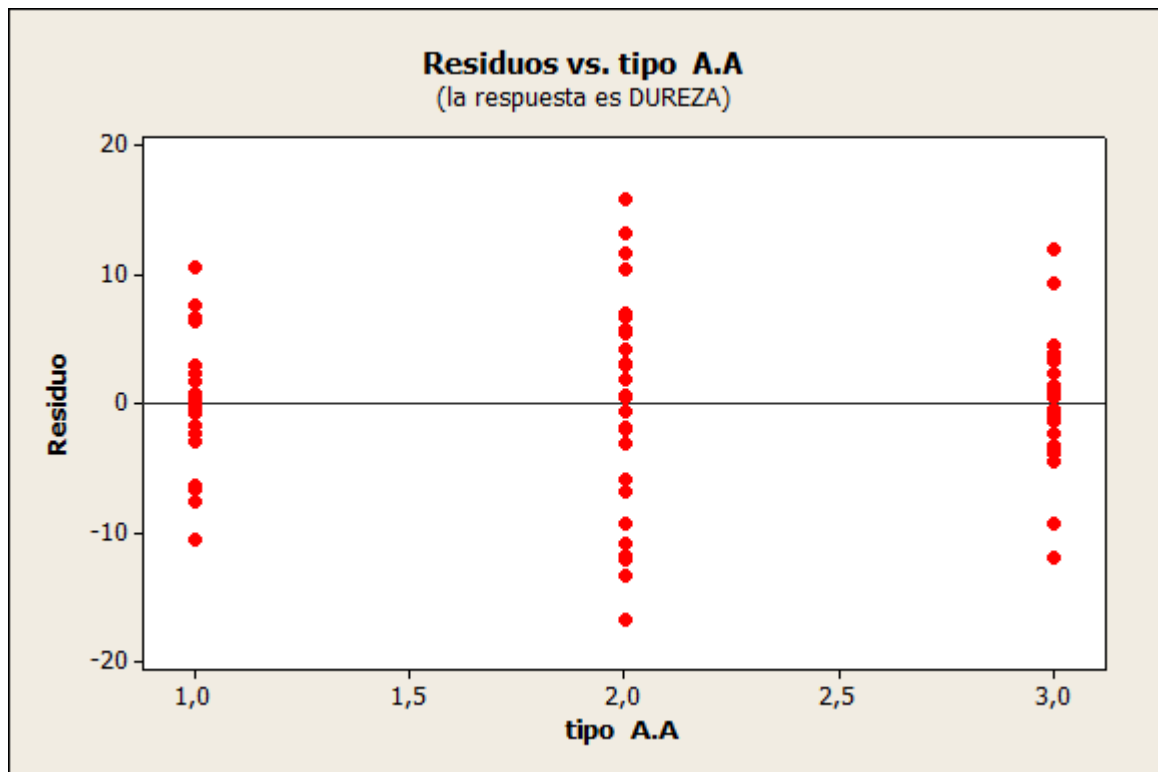
Fuente. Software Minitab 15

La figura 36 se evidencia que existe variación en la varianza ya que se incrementa en función de la variable de respuesta *DUREZA*. Sin embargo también se observa que la varianza es mayor en el centro y menor en los extremos por ende se observa la correlación significativa que existe entre los factores, niveles, rangos y la variable de respuesta; pero la varianza puede cambiar con el tiempo, por lo tanto se requiere indagar si el modelo tiene un comportamiento lineal o cuadrático que mejor me explique la variable de respuesta.

## 6.12.2 Residuales vs. Cada predictor “factores seleccionados”

### 6.12.2.1 Residuos vs. Tipo agujero de alivio

Figura 37. Gráfica de residuales vs. Factores seleccionados en diseño de experimentos.



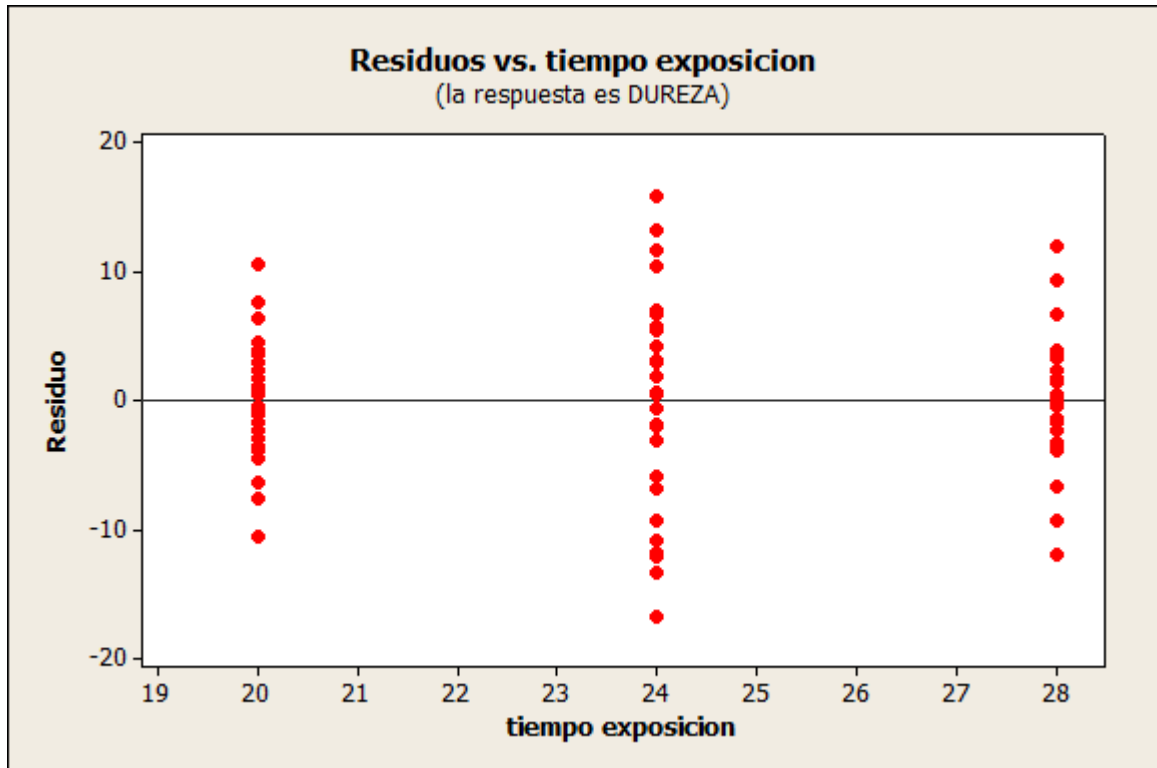
Fuente. Software Minitab 15

La figura 37 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; por consiguiente existe un modelo cuadrático que debe de tenerse en

cuenta al realizar el *FULL FACTORIAL*, y este se comprobara con la generación de puntos centrales en el diseño factorial completo seleccionado.

#### 6.12.2.2 Residuos vs. Tiempo de exposición

Figura 38. Gráfica de residuales vs. Tiempo de exposición.



Fuente software Minitab 15

La figura 38 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; por consiguiente existe un modelo cuadrático que debe de tenerse en cuenta al realizar el *FULL FACTORIAL*, y este se comprobara con la generación de puntos centrales en el diseño factorial completo seleccionado.

### 6.12.3 Comprobación estadística de varianzas iguales de modelo fraccionado

#### Prueba de varianzas iguales: DUREZA vs. grados brix. temperatura . ...

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándares

grados brix	temperatura chiller	presión flauta	potencia bobina	tiempo exposición	diámetro piñón	tipo A.A	N
4	13	50	28	20	195,3	3	2
4	13	50	28	28	195,3	1	2
4	13	50	32	20	175,6	1	2
4	13	50	32	28	175,6	3	2
4	13	90	28	20	175,6	3	2
4	13	90	28	28	175,6	1	2
4	13	90	32	20	195,3	1	2
4	13	90	32	28	195,3	3	2
4	18	50	28	20	175,6	1	2
4	18	50	28	28	175,6	3	2
4	18	50	32	20	195,3	3	2
4	18	50	32	28	195,3	1	2
4	18	90	28	20	195,3	1	2
4	18	90	28	28	195,3	3	2
4	18	90	32	20	175,6	3	2
4	18	90	32	28	175,6	1	2
4,5	15,5	70	30	24	185,45	2	33
5	13	50	28	20	175,6	1	2
5	13	50	28	28	175,6	3	2
5	13	50	32	20	195,3	3	2
5	13	50	32	28	195,3	1	2
5	13	90	28	20	195,3	1	2
5	13	90	28	28	195,3	3	2
5	13	90	32	20	175,6	3	2
5	13	90	32	28	175,6	1	2
5	18	50	28	20	195,3	3	2
5	18	50	28	28	195,3	1	2
5	18	50	32	20	175,6	1	2
5	18	50	32	28	175,6	3	2
5	18	90	28	20	175,6	3	2
5	18	90	28	28	175,6	1	2
5	18	90	32	20	195,3	1	2
5	18	90	32	28	195,3	3	2



# Grados

brix	Inferior	Desv.Est.	Superior
4	0,26380	0,8839	874,5
4	0,79140	2,6517	2623,5
4	3,42941	11,4905	11368,4
4	1,31900	4,4194	4372,5
4	2,63801	8,8388	8744,9
4	0,52760	1,7678	1749,0
4	3,95701	13,2583	13117,4
4	2,11041	7,0711	6995,9
4	0,52760	1,7678	1749,0
4	0,52760	1,7678	1749,0
4	0,26380	0,8839	874,5
4	0,79140	2,6517	2623,5
4	*	0,0000	*
4	0,52760	1,7678	1749,0
4	0,79140	2,6517	2623,5
4	0,26380	0,8839	874,5
4,5	6,29316	8,8910	14,3
5	3,69321	12,3744	12242,9
5	2,37421	7,9550	7870,4
5	2,37421	7,9550	7870,4
5	0,52760	1,7678	1749,0
5	0,52760	1,7678	1749,0
5	0,79140	2,6517	2623,5
5	1,05520	3,5355	3498,0
5	2,11041	7,0711	6995,9
5	0,26380	0,8839	874,5
5	*	0,0000	*
5	3,42941	11,4905	11368,4
5	3,16561	10,6066	10493,9
5	0,52760	1,7678	1749,0
5	0,52760	1,7678	1749,0
5	1,05520	3,5355	3498,0
5	5,80362	19,4454	19238,9

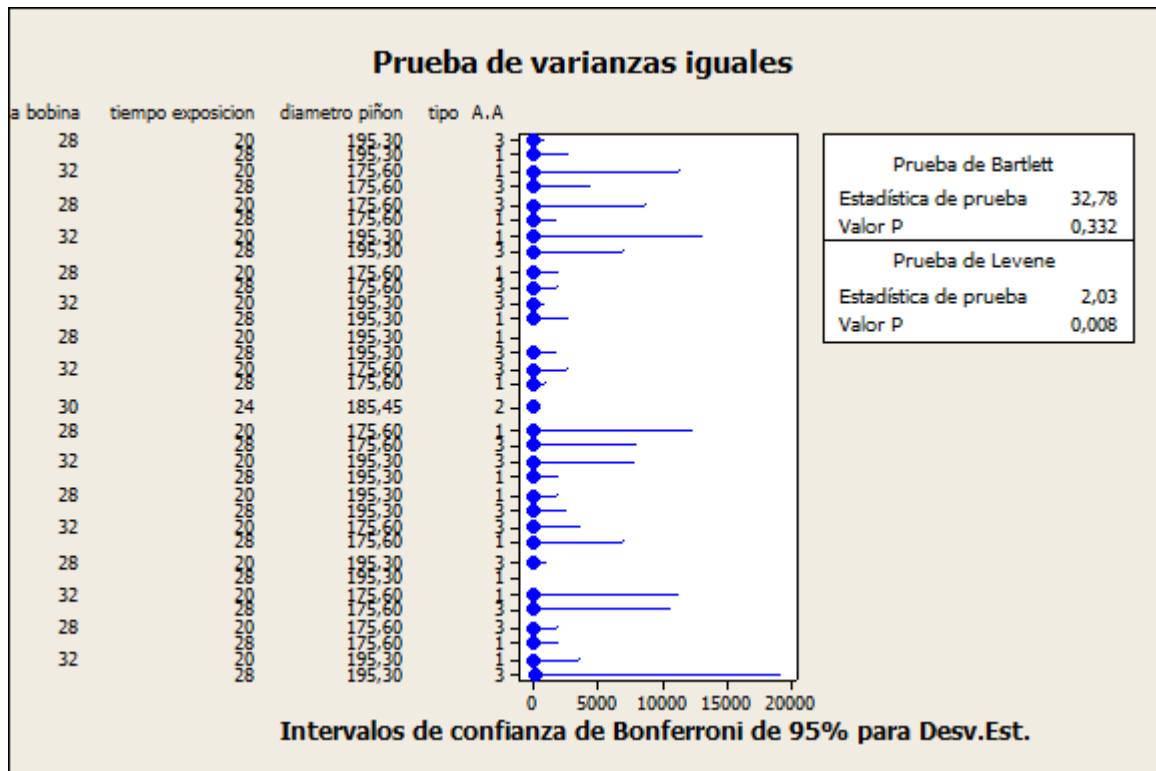
Prueba de Bartlett (distribución normal)

Estadística de prueba = 32,78. Valor p = 0,332

Prueba de Levene (cualquier distribución continua)

Estadística de prueba = 2,03. Valor p = 0,008

Figura 39. Prueba de varianzas iguales.

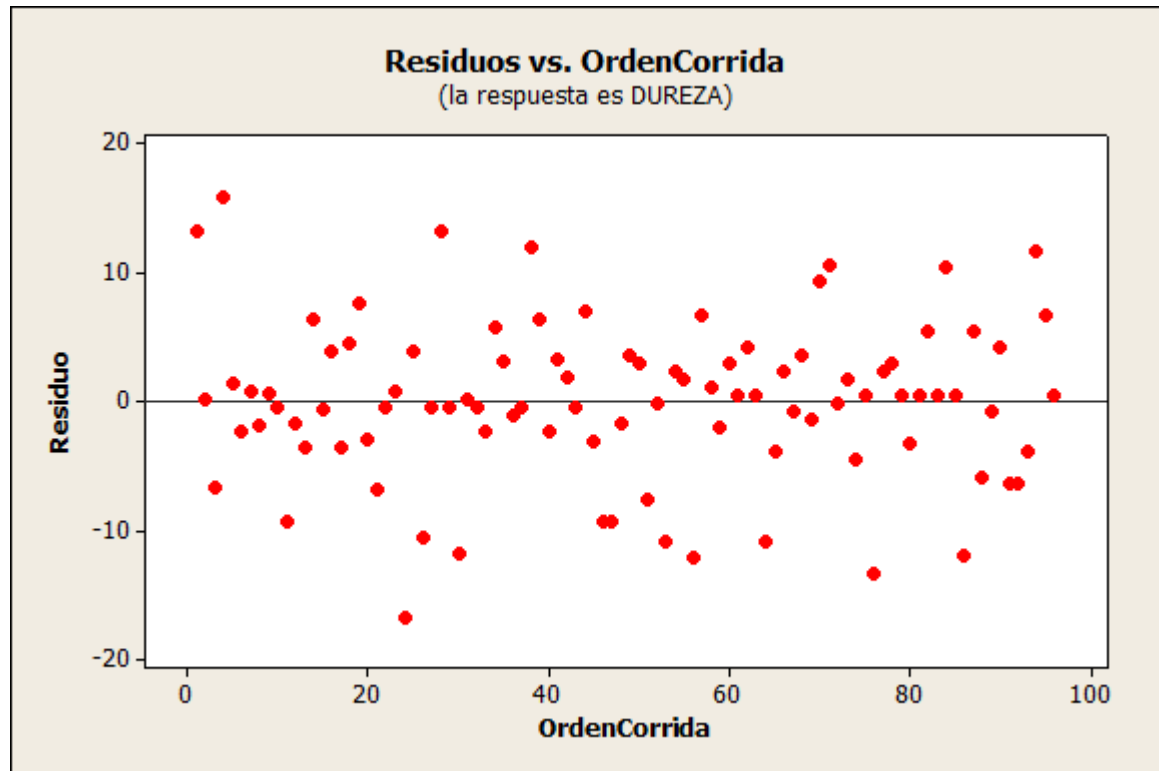


Fuente. Software Minitab

Existe homogeneidad de las varianzas, es decir, aún cuando los valores de error estadístico difieren entre sí, el procedimiento señala que es un efecto aleatorio y existe gran probabilidad de que la fuente o fuentes de variación sean las mismas.

### 6.13 Independencia de errores

Figura 40. Gráfica de residuales vs. Orden de corrida de diseño de experimentos.



Fuente. Software Minitab 15

Los datos como lo muestra la figura 40 no tienen una tendencia establecida, ya que se observa una nube de puntos en las diferentes corridas establecidas en el modelo fraccionado de Minitab.

Se concluye estadísticamente que los factores más significativos y que aportan un efecto considerable sobre la variable de respuesta son *tiempo de exposición*, *tipo agujero de alivio*; los demás factores no tiene significancia sobre la variable de respuesta. Por consiguiente y para la etapa de caracterización las demás variables se fijaran en los valores que mejor rendimiento presentan según el análisis del diseño factorial en software Minitab; cabe notar que como el factor ruido o bloque fue significativo también se llevara a esta fase, como los puntos centrales dado que el modelo presento un grado de significancia en cuanto a la curvatura, siendo esta identificada e incluida para la fase de caracterización.

## 6.14 Fase caracterización

### 6.14.1 Full factorial

El diseño Full factorial generado por el software Minitab que se muestra en la tabla 7 se aplica al proceso de tratamiento térmico teniendo como variable de respuesta la dureza Rockwell C (HRC); se parametrizan cada una de las variables según los valores que arroja cada corrida.

Tiempo de exposición

Valor mínimo (-1)= 20 seg

Valor máximo (+1)= 28 seg

Tipo A.A.

Valor mínimo (-1)= 1

Valor máximo (+1)= 3

Temperatura ambiente

Valor mínimo (-1)= 1

Valor máximo (+1)= 2

Tabla 7. Listado de corridas según Minitab para diseño full factorial

<b>OrdenE st</b>	<b>OrdenCorri da</b>	<b>PuntoCentr al</b>	<b>Bloque s</b>	<b>Tiempo de exposicio n</b>	<b>Tipo A.A.</b>	<b>Temperatu ra ambiente</b>
18	1	0	1	24	2	1,5
20	2	0	1	24	2	1,5
11	3	1	1	20	3	1
13	4	1	1	20	1	2
4	5	1	1	28	3	1
7	6	1	1	20	3	2
5	7	1	1	20	1	2
14	8	1	1	28	1	2
12	9	1	1	28	3	1
1	10	1	1	20	1	1
16	11	1	1	28	3	2
6	12	1	1	28	1	2
8	13	1	1	28	3	2
2	14	1	1	28	1	1
17	15	0	1	24	2	1,5
10	16	1	1	28	1	1
19	17	0	1	24	2	1,5
15	18	1	1	20	3	2
3	19	1	1	20	3	1
9	20	1	1	20	1	1

Fuente. Software Minitab 15

#### 6.14.2 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE de FULL FACTORIAL.

Para la aplicación del diseño en el proceso de tratamiento térmico se requiere la siguiente fabricación de piñones en acero, los cuales tienen unas especificaciones que se relacionan en la tabla 7; estas especificaciones están dadas por las 5 variables que fueron descartadas por no tener incidencia sobre la variable de respuesta y las 2 variables que inciden sobre esta, además de 1 variable adicional la cual se incluye en el modelo que representaba el bloque en el diseño fraccionado, dado que esta variable tiene incidencia en el modelo ya que estadísticamente  $P < 0,05$  y por consiguiente debe de incluirse para efectos de la investigación.

Tabla 8. Planeación de la producción de las muestras para diseño de experimentos full factorial.

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL(m)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO
Referencia DOE 1	1(AX)	56	195,3	8	10
Referencia DOE 2	3(BEST)	56	195,3	8	10
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2(RX)</b>	<b>56</b>	<b>195,3</b>	<b>4</b>	<b>10</b>

Fuente. Departamento de planeación y programación Integrando LTDA.

En total son 20 piñones que se requieren para la investigación; la referencia que aparece resaltada en color rojo hace alusión a los puntos centrales. Estos piñones se programaron como lo muestra la tabla 9, desde el depto. De planeación y programación de la producción de Integrando LTDA., el cual también abrió el espacio para la realización del experimento puesto que este tiempo en el cual se realiza se para la línea de producción, por ende se planea para no afectar significativamente la producción.

Tabla 9. Programación de la producción de las muestras para la aplicación del full factorial en proceso de tratamiento térmico

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL(mm)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO	OP (ORDEN DE PRODUCCION)	TIEMPO
Referencia DOE 1	1(AX)	56	195,3	8	10	188MA	1 HOR A
Referencia DOE 2	3(BEST)	56	195,3	8	10	190MA	1 HOR A
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2(RX)</b>	<b>56</b>	<b>195,3</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	189MA	0,5 HOR A

Fuente. Departamento de planeación y programación de la producción Integrando LTDA.

#### 6.14.3 Modelo full factorial de diseño de experimento DOE

El modelo está planteado de la siguiente manera el cual permite de forma completa realizar todas las posibles interacciones y sus respuestas para así lograr obtener los valores deseados.

$$2^3 = 8 + 8 + 4 = 20 \quad (1.4)$$

Donde:

El primer número 8 representa a la primera corrida, el segundo 8 representa a la segunda corrida (replica) y el numero 4 representa a los puntos centrales que dejen observar si existe curvatura en el modelo.

#### 6.14.3.1 Aplicación del DOE en proceso de tratamiento térmico por inducción

El diseño full factorial generado por el software Minitab que se muestra en la tabla 10 se aplica al proceso de tratamiento térmico teniendo como variable de respuesta la dureza Rockwell C (HRC); se parametrizan cada una de las variables según los valores que arroja cada corrida y se toma el dato de la dureza como se muestra en la tabla. Adicional se toman los siguientes valores para las variables que no se seleccionaron para el experimento por no incidir sobre la variable de respuesta; estos valores son los que mejor tienen respuesta sobre el modelo según Minitab.

Grados brix = 4,0

Temperatura chiller= 18°C

Presión flauta= 90 PSI

Potencia bobina= 32 Kw

Tiempo de exposición

Valor mínimo (-1)= 20 seg

Valor máximo (+1)= 28 seg

Tipo A.A.

Valor mínimo (-1)= 1

Valor máximo (+1)= 3

Temperatura ambiente

Valor mínimo (-1)= 1

Valor máximo (+1)= 2



Tabla 10. Listado de corridas con valor arrojado de dureza luego de aplicación de full factorial en proceso de tratamiento térmico

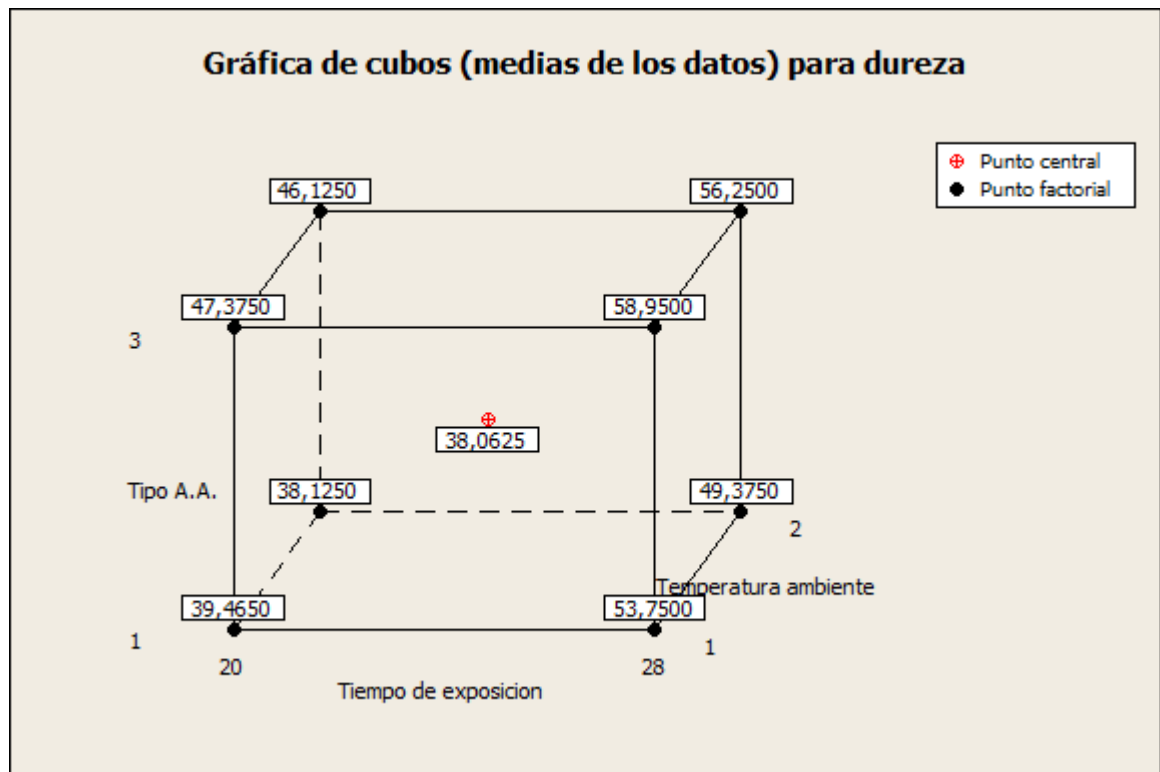
Orden Est	OrdenCorrida	PuntoCentral	Bloques	Tiempo de exposicion	Tipo A.A.	Temperatura ambiente	dureza
18	1	0	1	24	2	1,5	46,25
20	2	0	1	24	2	1,5	36,25
11	3	1	1	20	3	1	49,75
13	4	1	1	20	1	2	43,75
4	5	1	1	28	3	1	54,75
7	6	1	1	20	3	2	46
5	7	1	1	20	1	2	32,5
14	8	1	1	28	1	2	53,75
12	9	1	1	28	3	1	63,15
1	10	1	1	20	1	1	41,43
16	11	1	1	28	3	2	63,75
6	12	1	1	28	1	2	45
8	13	1	1	28	3	2	48,75
2	14	1	1	28	1	1	55
17	15	0	1	24	2	1,5	30
10	16	1	1	28	1	1	52,5
19	17	0	1	24	2	1,5	39,75
15	18	1	1	20	3	2	46,25
3	19	1	1	20	3	1	45
9	20	1	1	20	1	1	37,5

Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.

Estos son los valores de dureza para cada una de las corridas arrojadas por Minitab; dichas unidades fueron seleccionadas para seguir su proceso o desecho por parte del depto. De calidad de Integrando LTDA., ya que unas cumplían con especificaciones y otras no. No se reportaron novedades y se realizó el experimento en los tiempos mencionados por la variable temperatura ambiente, ya que esta tiene incidencia sobre la variable de respuesta *Dureza*.

#### 6.14.4 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION (FULL FACTORIAL)

Figura 41. Gráfica de cubos de diseño full factorial para variable de respuesta dureza

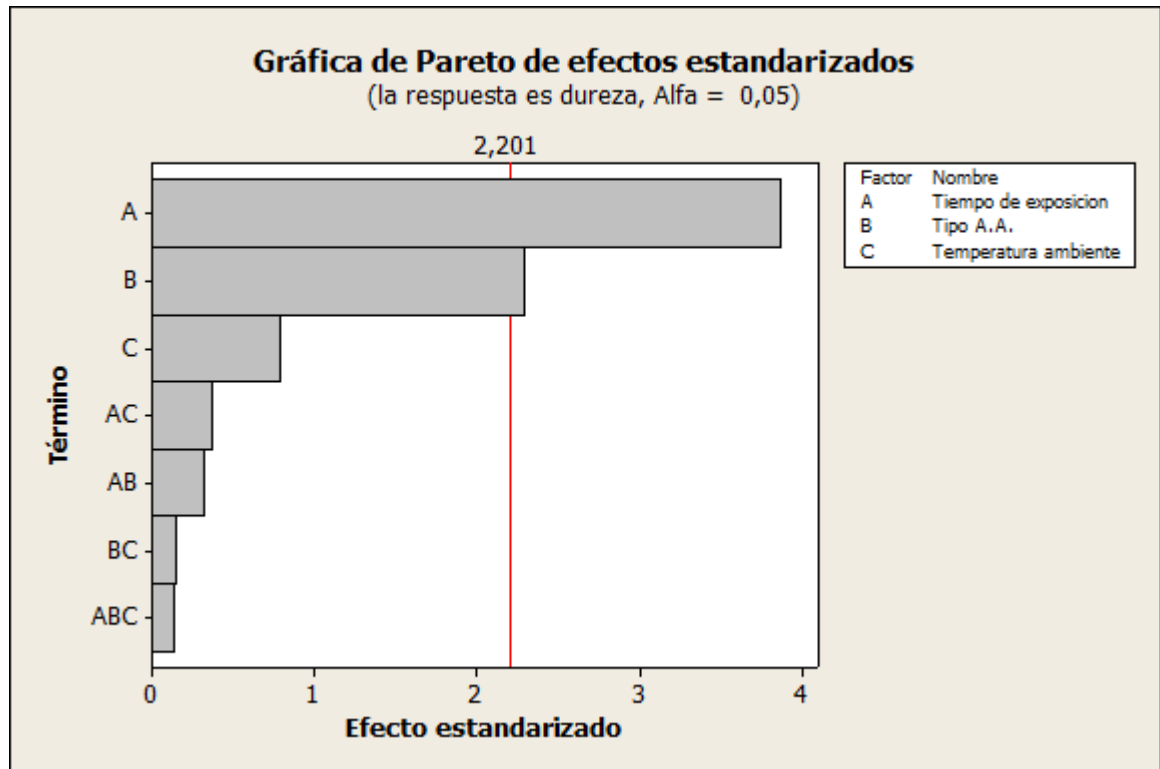


Fuente. Software Minitab 15

En la figura 41 se puede observar la distribución de las variables en los diferentes niveles, así como su punto central. Estos valores están amarrados a la variable de respuesta por ende están sujetos a los valores concebidos en esta. La gráfica de cubos es una manera dinámica de observar como está planteado el modelo de full factorial para el proceso de tratamiento térmico de inducción de la empresa Integrando LTDA.

#### 6.14.5 Análisis de Pareto de efectos de full factorial para *DUREZA ROCKWELL C (HRC)*

Figura 42. Gráfica de pareto de efectos estandarizados en diseño full factorial



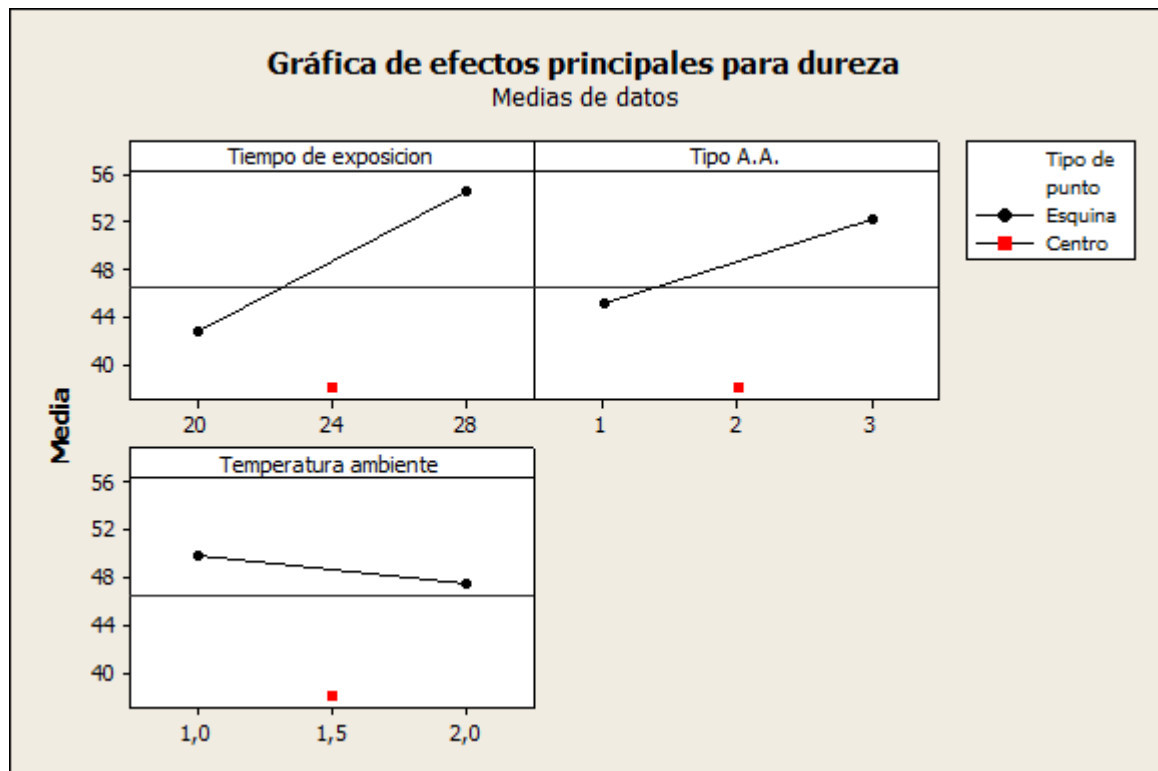
Fuente. Software Minitab 15

En la figura 42 se evidencia que las factores que más inciden en la variable de repuesta son la A (tiempo de exposición), B (tipo agujero de alivio); superando  $\alpha = 0,05$  codificado. Estos factores inciden significativamente puesto que estadísticamente tienen un valor  $P < 0,05$ , mientras que la variable *temperatura ambiente* no tiene incidencia en el modelo porque estadísticamente tiene un valor  $P > 0,05$ . Se concluye que los efectos de las interacciones no tienen incidencia en el modelo puesto que estadísticamente tienen un valor  $P > 0,05$ , estas son descartadas y no se tienen en cuenta cuando se determine la ecuación que mejor da respuesta al modelo.

#### 6.14.6 Análisis de efectos principales modelo full factorial para *DUREZA ROCKWELL C (HRC)*

A continuación se hace análisis gráfico de cada efecto principal del modelo full factorial como se muestra en la figura 43.

Figura 43. Grafica de efectos principales para dureza

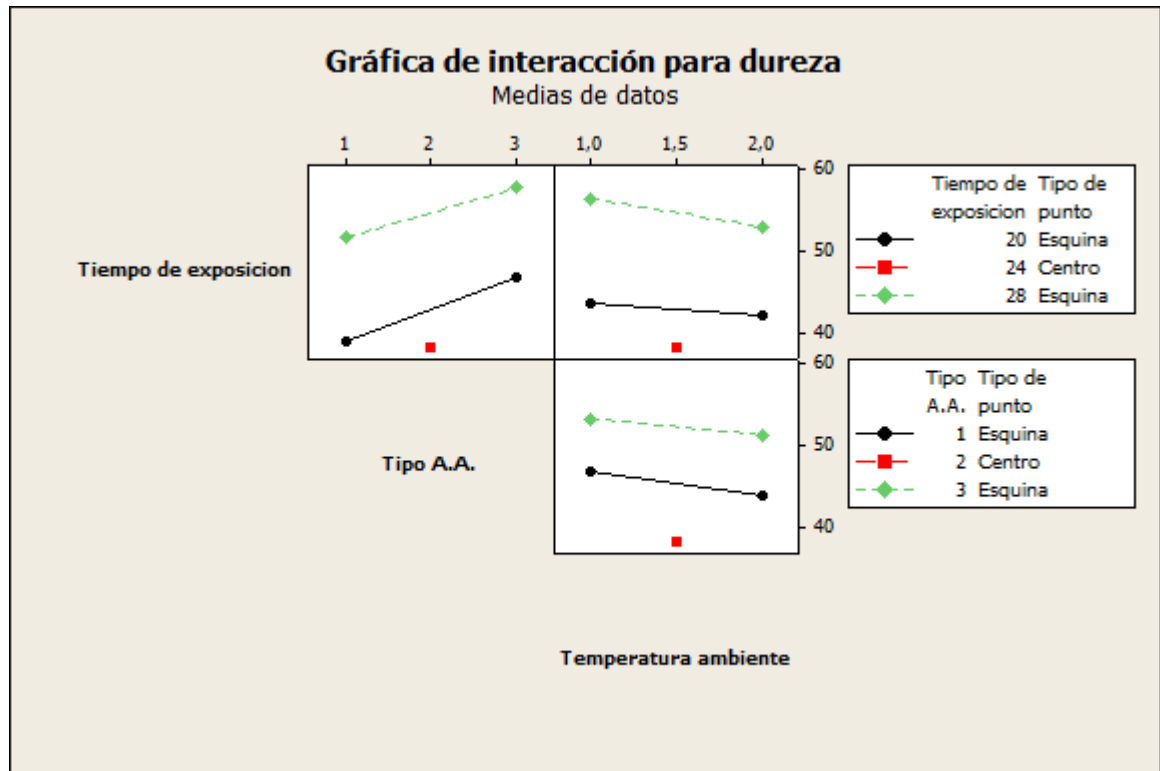


Fuente. Software Minitab 15

En la figura 43 se observa que las variables tiempo de exposición y tipo de agujero de alivio tienen una recta pronunciada, lo que concluye que gráficamente estas tienen incidencia sobre la variable de respuesta, mientras que la variable temperatura ambiente no tiene incidencia sobre el modelo ya que la pendiente de la recta es menos pronunciada que las otras variables por ende se concluye gráficamente que esta no tienen significancia dentro del modelo. Cabe notar que el punto rojo que se encuentra dentro de cada grafica de efectos hace alusión a los puntos centrales, los cuales permiten observar si existe curvatura que para este caso es evidente la existencia de curvatura en el modelo y que finalmente tendría un comportamiento de parábola si se unieran los puntos que se observan en cada gráfico.

#### 6.14.7 Interacciones de factores en full factorial para variable de respuesta *DUREZA ROCKWELL C*

Figura 44. Gráfica de interacción para dureza en full factorial



Fuente. Software Minitab 15

La figura 44 permite visualizar que las interacciones que se presentan en el modelo ninguna tiene incidencia sobre la variable de respuesta *DUREZA*, puesto que gráficamente se observa que no hay cruce de las rectas lo que se concluye que la interacción no es significativa y que por ende no deben de tenerse en cuenta para la fase de optimización del modelo planteado.

#### 6.14.7 ANOVA para efectos principales en modelo Full factorial que inciden en la DUREZA ROCKWELL C

En el siguiente análisis de resultados se presenta el análisis DE LA VARIANZA CON UN FACTOR (ANOVA) que permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que una población difiere de la otra.

#### Ajuste factorial: dureza vs. Tiempo de ex. Tipo A.A.. Temperatura

Efectos y coeficientes estimados para dureza (unidades codificadas)

Término	Coef.				
	Efecto	Coef de EE	T	P	
Constante	48,68	1,526	31,91	0,000	
Tiempo de exposición	11,81	5,90	1,526	3,87	0,003
Tipo A.A.	7,00	3,50	1,526	2,29	0,043
Temperatura ambiente	-2,42	-1,21	1,526	-0,79	0,445
Tiempo de exposición*Tipo A.A.	-0,96	-0,48	1,526	-0,31	0,759
Tiempo de exposición*	-1,12	-0,56	1,526	-0,37	0,720
Temperatura ambiente					
Tipo A.A.*Temperatura ambiente	0,44	0,22	1,526	0,14	0,888
Tiempo de exposición*Tipo A.A.*	0,40	0,20	1,526	0,13	0,899
Temperatura ambiente					
Ct Pt	-10,61	3,412	-3,11	0,010	

S = 6,10271 PRESS = 1755,97

R-cuad. = 73,69% R-cuad.(pred.) = 0,00% R-cuad.(ajustado) = 54,56%

El modelo presenta un  $R^2(ajustado)$  de 54,56%, este hace alusión al coeficiente de determinación, que significa que el modelo que tiene variable de respuesta la dureza esta explicado en dicho porcentaje por los factores y sus efectos sobre esta. Por consiguiente es un porcentaje el cual es confiable y permite obtener información significativa para la toma de decisiones sobre el proceso.

Según ANOVA los efectos principales que tienen incidencia sobre la variable de respuesta son:

- El tiempo de exposición con un efecto codificado de 11,81
- Tipo de agujero de alivio con un efecto codificado de 7,00

Esto debido a que el valor  $P$ , que permite estadísticamente determinar si cada factor e interacción incide sobre la variable de respuesta es para cada una de las anteriores  $P < 0,05$  lo que se concluye que tiene gran significancia sobre la variable de respuesta *DUREZA ROCKWELL C*. Para el caso de los demás efectos e interacciones se concluye que no tienen incidencia en el modelo, ya que no son significativas para la variable de respuesta soportado por el valor  $P$  el cual es  $P > 0,05$  que se evidencia en los resultados arrojados por Minitab. Adicional a que la ANOVA compara la variación entre los niveles y dentro de un nivel dado, esto permite tener un panorama más claro de la variación que se presenta por el efecto e interacción de las diferentes variables.

#### 6.14.7.1 Análisis puntos centrales del modelo full factorial para *DUREZA ROCKWELL C*

Análisis de varianza para dureza (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	3	776,93	776,929	258,976	6,95
2-Interacciones de (No.) factores	3	9,48	9,484	3,161	0,08
3-Interacciones de (No.) factores	1	0,63	0,628	0,628	0,02
Curvatura	1	360,53	360,528	360,528	9,68
Error residual	11	409,67	409,674	37,243	
Error puro	11	409,67	409,674	37,243	
Total	19	1557,24			

Fuente	P
Efectos principales	0,007
2-Interacciones de (No.) factores	0,967
3-Interacciones de (No.) factores	0,899
Curvatura	0,010
Error residual	
Error puro	
Total	

Los puntos centrales permiten verificar si existe curvatura en el modelo planteado, además proporciona la información necesaria para determinar la ecuación resultante de este, la cual puede ser lineal o cuadrática de segundo y tercer orden. Según el análisis arrojado por Minitab el modelo planteado de Full factorial presenta curvatura dado que el valor  $P$  es  $P < 0,05$ , por consiguiente se concluye

que es significativa la curvatura, sin embargo la ecuación se plantea por el momento como un modelo lineal hasta que se compruebe la curvatura en la fase de optimización.

#### 6.14.8 Coeficientes del diseño full factorial

A continuación cada coeficiente para cada efecto e interacción generada en el modelo y que hace parte de la ecuación que permite obtener el mejor rendimiento que en este caso es sobre la dureza, sin embargo cabe resaltar que se requiere realizar superficie de respuesta para encontrar los valores óptimos que mejor rendimiento me generan en dicha variable.

Coeficientes estimados para dureza utilizando datos en unidades descodificadas

Término	Coef
Constante	-11,7738
Tiempo de exposición	2,43344
Tipo A.A.	9,2788
Temperatura ambiente	8,1838
Tiempo de exposición*Tipo A.A.	-0,26844
Tiempo de exposición* Temperatura ambiente	-0,47844
Tipo A.A.*Temperatura ambiente	-1,9363
Tiempo de exposición*Tipo A.A.* Temperatura ambiente	0,099063
Ct Pt	-10,6144

La ecuación descodificada que representa el modelo full factorial es la siguiente:

$$DUREZA = -11,7738 + 2,43344(\text{tiempo exposicion}) + 9,2788(\text{tipo agujero alivio})$$

Esta ecuación permite tener el mejor rendimiento para la dureza, la cual es la variable de respuesta y permite estimar los valores más significativos para las variables incidentes en el modelo.

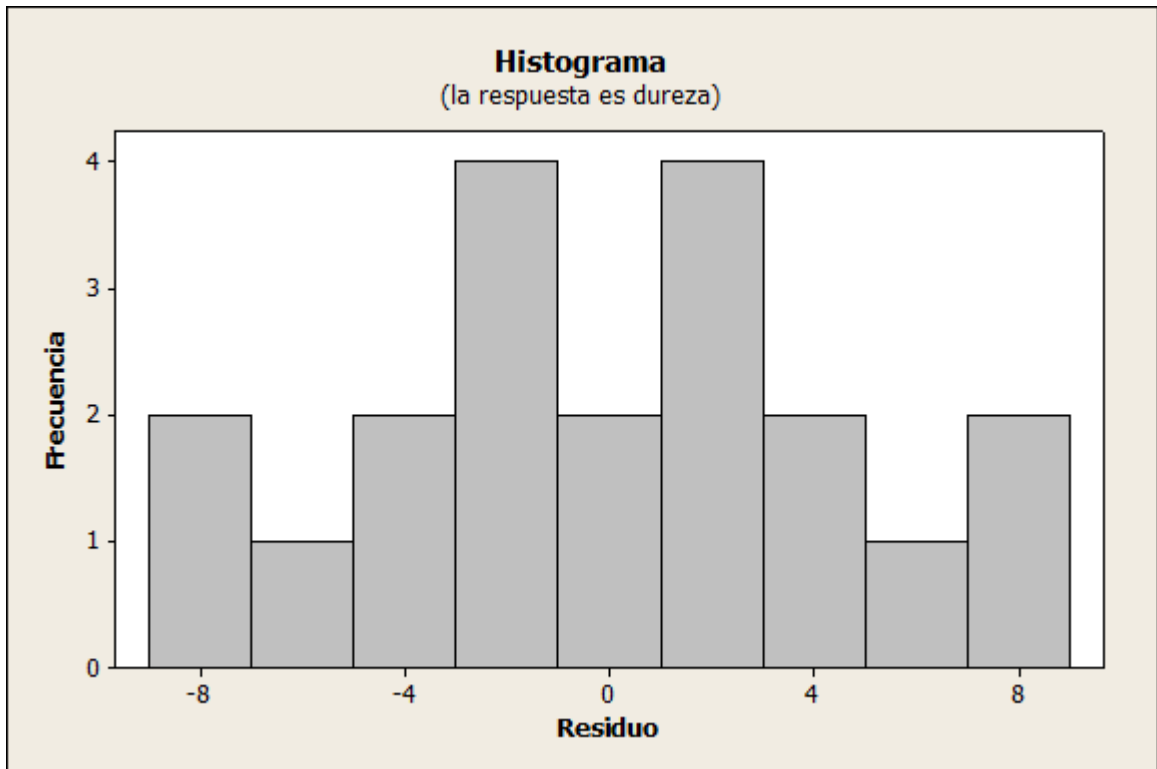


#### 6.14.9 Análisis de residuales del DOE FULL FACTORIAL

Los residuales son la variación que no está explicada en los modelos de regresión, por lo tanto los residuales pueden ser entendidos como los valores del error observado en cada medición. Los análisis de residuales pueden ser una herramienta efectiva para descubrir diferentes deficiencias que pueden tener el modelo y su impacto sobre la variabilidad.

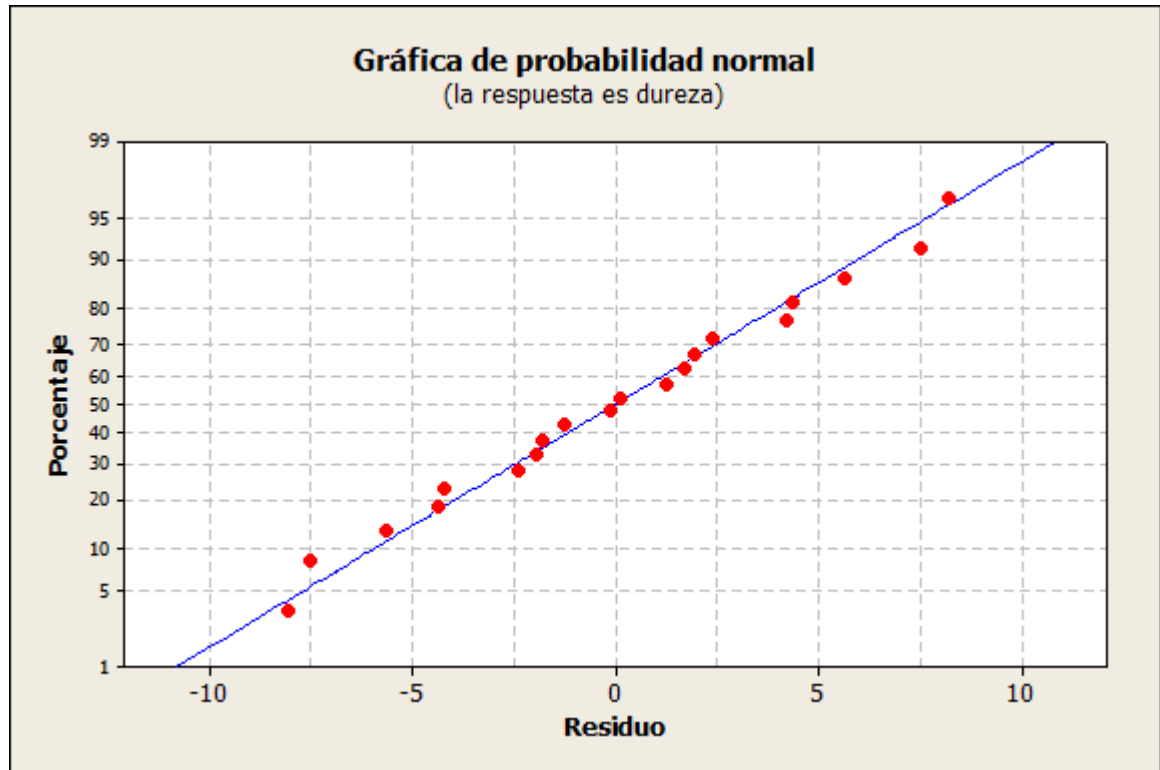
##### 6.14.9.1 Probabilidad normal de los residuales

Figura 45. Grafica de comprobación estadística de normalidad de residuales.



Fuente. Software Minitab 15

Figura 46. Grafica de probabilidad normal de residuales.

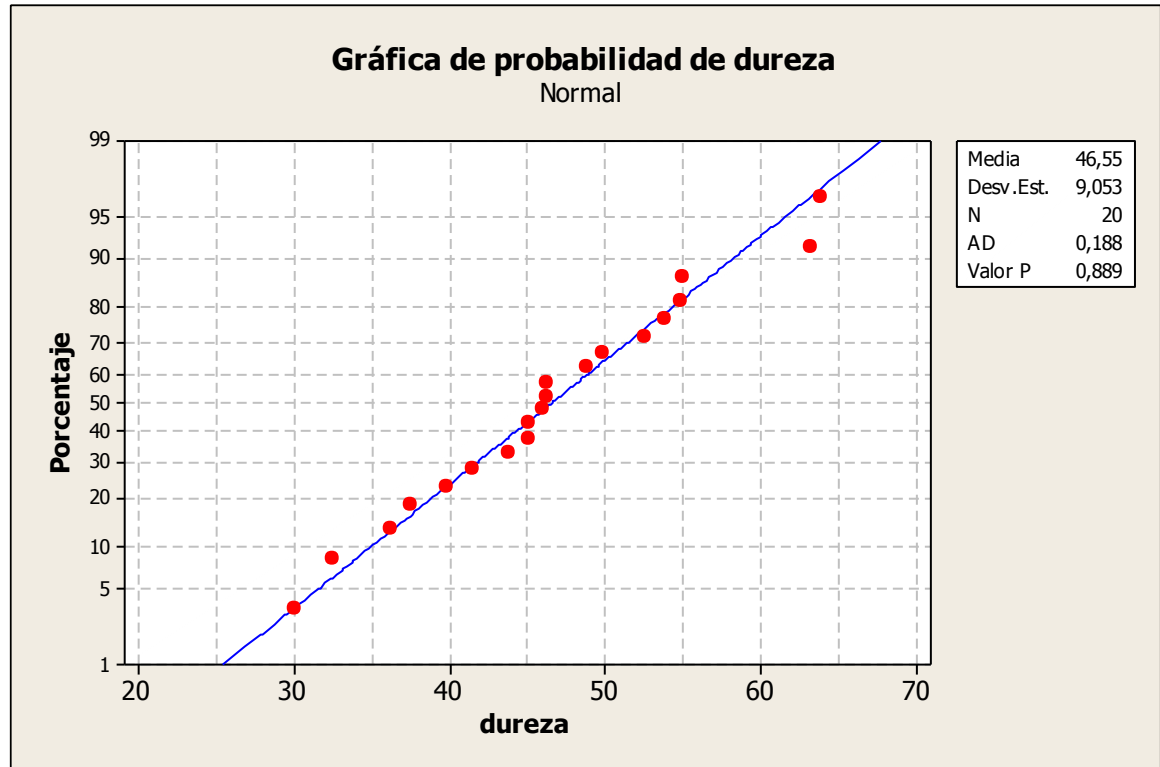


Fuente. Software Minitab 15

La figura 45 y 46 permiten evidenciar que la desviación de los datos del modelo siguen una distribución normal puesto que la forma que toman los datos es de una campana, por consiguiente gráficamente se determina que estos cumplen con criterios de normalidad. Adicional a esto se soporta con que los datos siguen una línea recta confirmando así que los datos son normales y que no existen grupos estadísticos que afecten el modelo, por lo tanto las variables y rangos están constituidos de tal manera que se genera información relevante para estimar un comportamiento del proceso de tratamiento térmico sobre la variable de respuesta dureza.

#### 6.14.9.2 Comprobación estadística de prueba de normalidad de Anderson Darling

Figura 47. Grafica de probabilidad de prueba de normalidad de Anderson Darling.



Fuente. Software Minitab 15

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

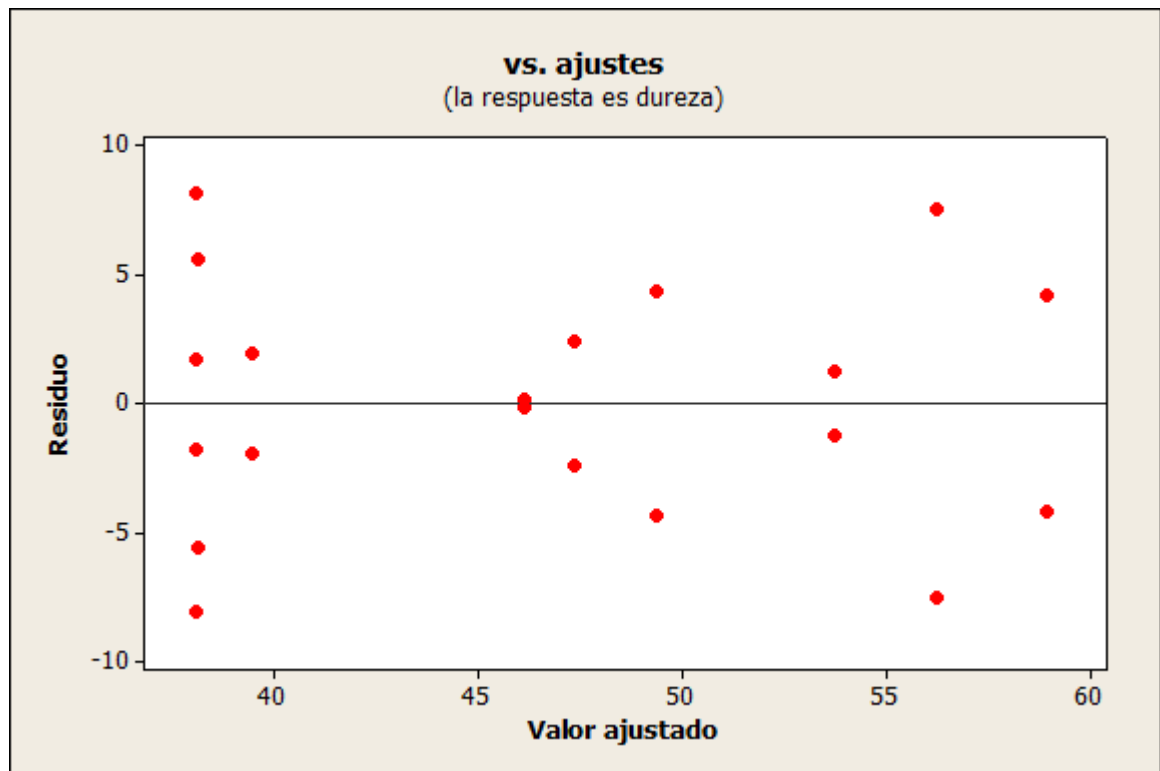
- $H_0$  = Los datos siguen una distribución exponencial
- $H_1$  = Los datos no siguen una distribución exponencial

Dado que los datos presentan un valor P  $P < 0,05$ , en donde el valor 0,05 se refiere al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) de que los datos no siguen una distribución exponencial.

#### 6.14.9.3 Residuales vs. Cada “valor de dureza” ajustado

Este análisis se utiliza para determinar si existen deficiencias en un modelo determinado; esto teniendo en cuenta la varianza ya que se da la relación entre factores y variable para observar la correlación que existe.

Figura 48. Grafica de residuales vs. Valor de dureza en full factorial



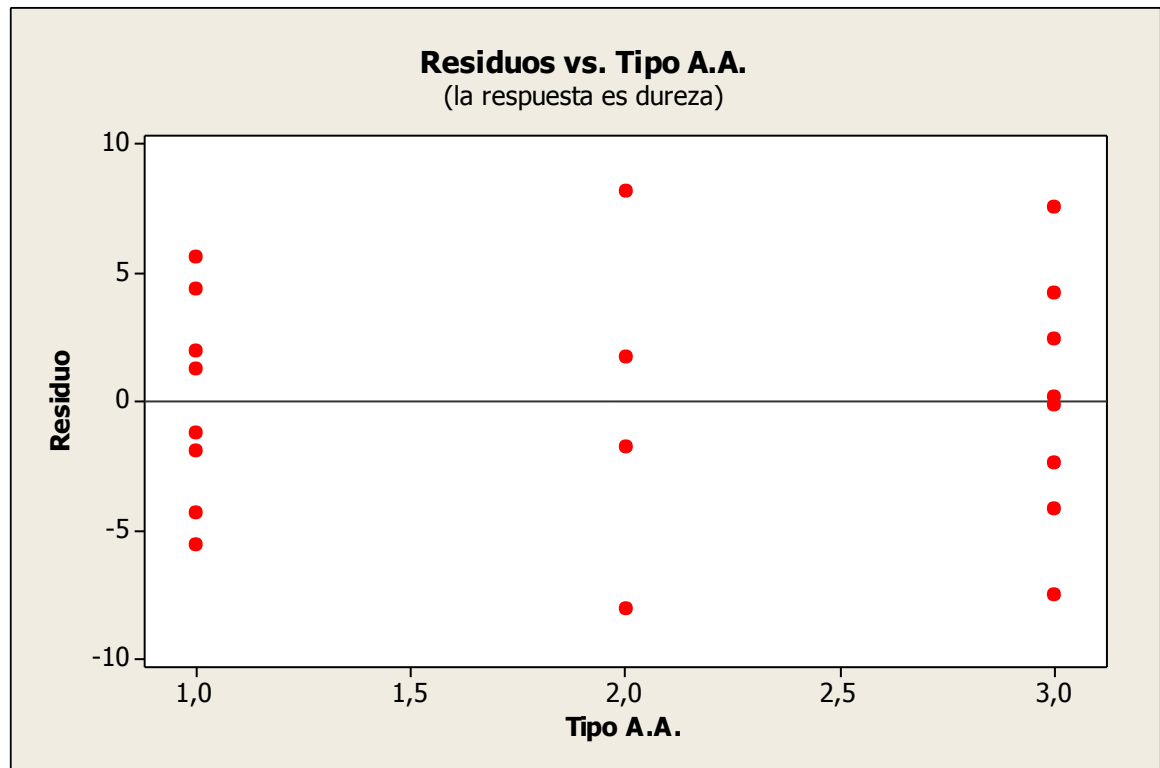
Fuente. Software Minitab 15

La figura 48 se evidencia que existe variación en la varianza ya que se incrementa en función de la variable de respuesta *DUREZA*. Sin embargo también se observa que la varianza es mayor en los extremos por ende la correlación significativa que existe entre los factores, niveles, rangos y la variable de respuesta. Por consiguiente se determina que no existen deficiencias en el modelo puesto que gráficamente se concluye que la varianza es constante y que en el tiempo no cambiara el comportamiento de esta.

#### 6.14.9.4 Residuales vs. Cada predictor “factores seleccionados”

Residuos vs. Tipo agujero de alivio

Figura 49. Grafica de residuos vs. Variable tipo agujero de alivio

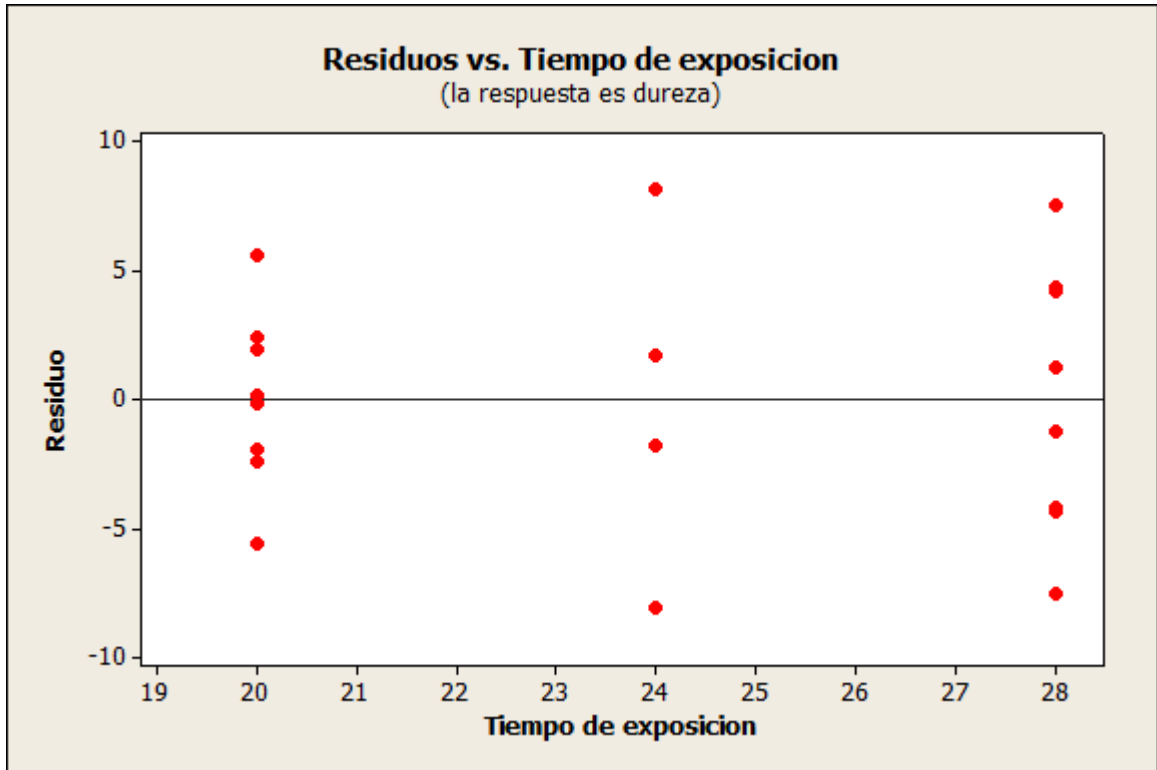


Fuente. Software Minitab 15

La figura 49 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; por consiguiente existe un modelo cuadrático, adicional a esto se evidencia que los datos de dureza están concentrados en los extremos lo que deduce que el mejor desempeño se encuentra en estas zonas, además que la variación está dada por los efectos y la interacción de estos con la variable de respuesta.

#### 6.14.9.5 Residuos vs. Tiempo de exposición

Figura 50. Grafica residuales vs. Variable tiempo de exposición en full factorial



Fuente. Software Minitab 15

La figura 50 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; adicional a esto se evidencia que los datos de dureza están concentrados en los extremos lo que deduce que el mejor desempeño se encuentra en estas zonas, además que la variación está dada por los efectos y la interacción de estos con la variable de respuesta.

#### 6.14.9.6 Comprobación estadística de varianzas iguales de modelo fraccionado

##### **Prueba de varianzas iguales: dureza vs. Tiempo de ex. Tipo A.A.. Temperatura**

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándares

Tiempo de exposición	Tipo A.A.	Temperatura ambiente	N	Inferior	Desv.Est.	Superior
20	1	1	2	0,92900	2,7789	798,21
20	1	2	2	2,65935	7,9550	2284,96
20	3	1	2	1,12284	3,3588	964,76
20	3	2	2	0,05910	0,1768	50,78
24	2	1,5	4	3,13088	6,7866	53,52
28	1	1	2	0,59097	1,7678	507,77
28	1	2	2	2,06838	6,1872	1777,19
28	3	1	2	1,98565	5,9397	1706,11
28	3	2	2	3,54580	10,6066	3046,62

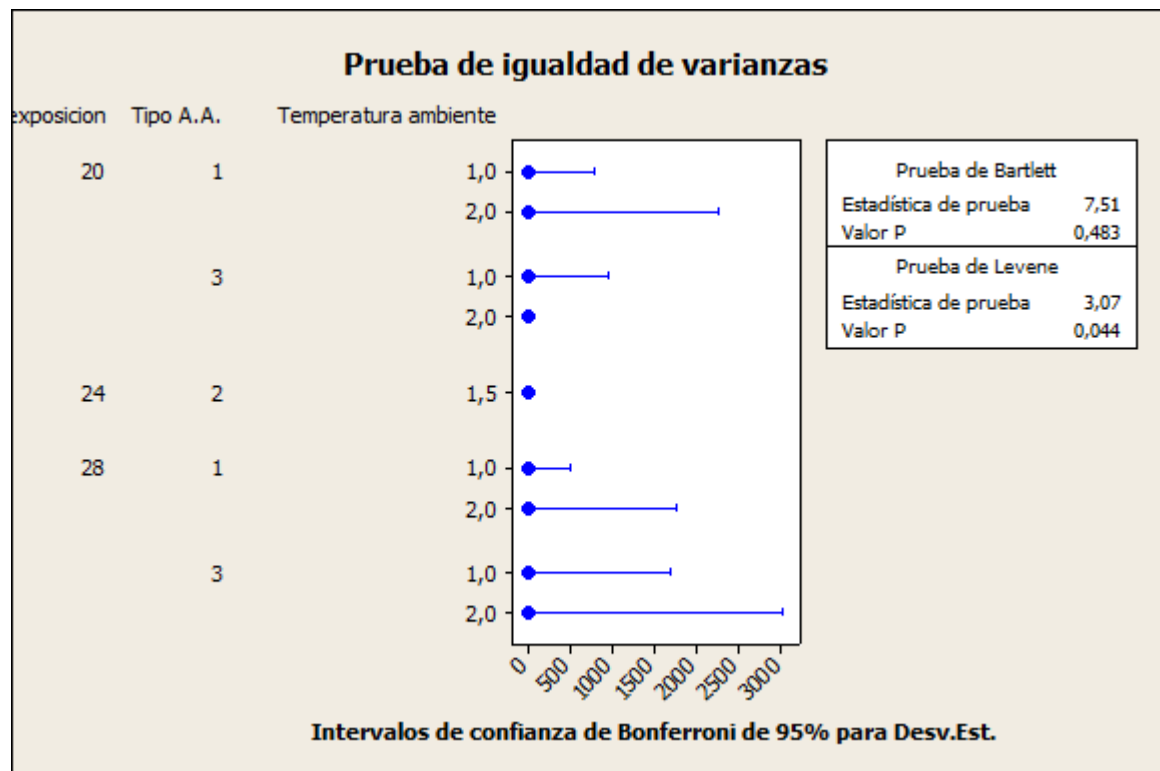
Prueba de Bartlett (distribución normal)

Estadística de prueba = 7,51. Valor p = 0,483

Prueba de Levene (cualquier distribución continua)

Estadística de prueba = 3,07. Valor p = 0,044

Figura 51. Prueba de igualdad de varianzas en full factorial



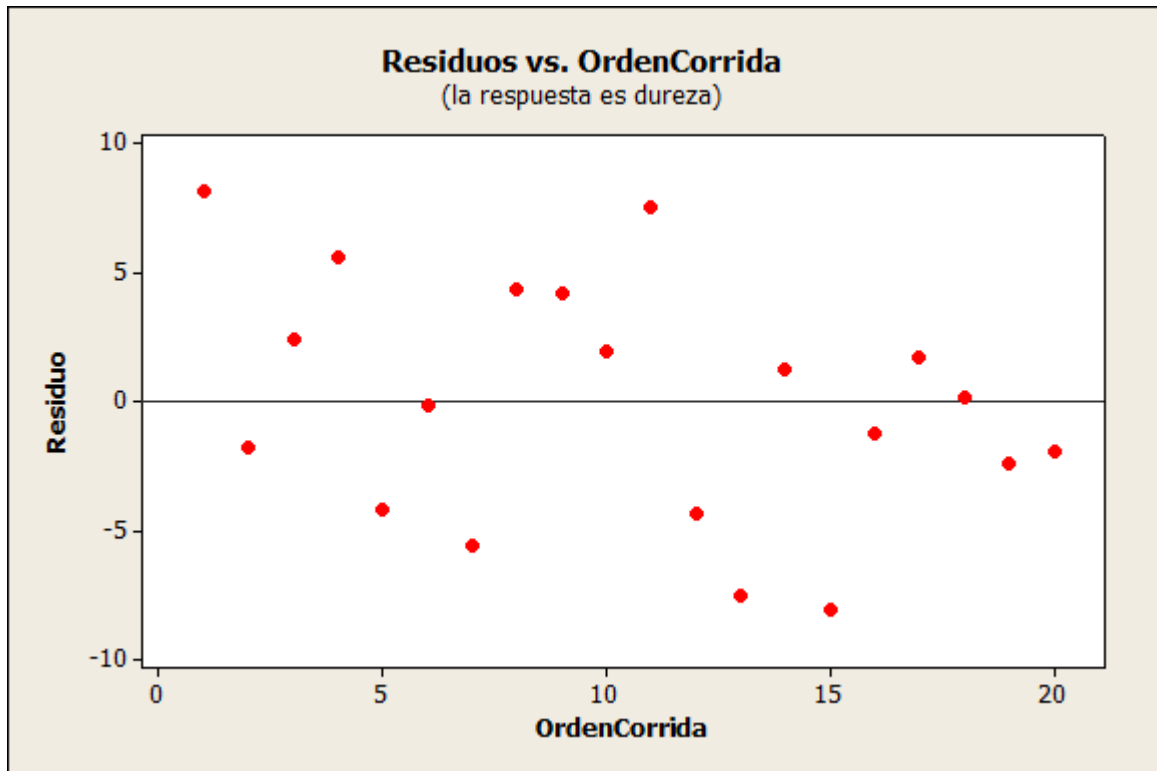
Fuente. Software Minitab 15

Existe homogeneidad de las varianzas, es decir, aún cuando los valores de error estadístico difieren entre sí, el procedimiento señala que es un efecto aleatorio y existe gran probabilidad de que la fuente o fuentes de variación sean las mismas.



#### 6.14.10 Independencia de errores

Figura 52. Grafica de residuales vs. Orden de corrida en full factorial



Fuente. Software Minitab 15

Los datos como lo muestra la figura 52 no tienen una tendencia establecida, ya que se observa una nube de puntos en las diferentes corridas establecidas en el modelo fraccionado de Minitab.

Se concluye estadísticamente que los factores más significativos y que aportan un considerablemente sobre la variable de respuesta son *tiempo de exposición*, *tipo agujero de alivio*; la variable *temperatura ambiente* no tiene significancia sobre la variable de respuesta. Por consiguiente y para la etapa de optimización las demás variables se fijaran en los valores que mejor rendimiento presentan según el análisis del diseño en software Minitab; cabe notar que la variable de ruido o de perturbación se llevó como variable en el diseño FULL FACTORIAL pero esta se descarta para la fase de optimización ya que estadísticamente su valor P es  $P > 0,05$ .

## 6.15 Fase de optimización

### 6.15.1 Superficie de respuesta

El diseño central compuesto generado por el software Minitab que se muestra en la tabla 11 se aplica al proceso de tratamiento térmico teniendo como variable de respuesta la dureza Rockwell C (HRC); se parametrizan cada una de las variables según los valores que arroja cada corrida.

Tiempo de exposición

Valor mínimo (-1)= 18,34314575 seg

Valor máximo (+1)= 29,65685425

Tipo A.A.

Valor mínimo (-1)= 0,58578644

Valor máximo (+1)= 3,41421356

Tabla 11. Listado de corridas según Minitab para full factorial

OrdenEst	OrdenCorrida	PtType	Bloques	Tiempo exposición	Tipo A.A.
1	1	1	1	20	1
2	2	1	1	28	1
3	3	1	1	20	3
4	4	1	1	28	3
5	5	-1	1	18,34314575	2
6	6	-1	1	29,65685425	2
7	7	-1	1	24	0,58578644
8	8	-1	1	24	3,41421356
9	9	0	1	24	2
10	10	0	1	24	2
11	11	0	1	24	2
12	12	0	1	24	2
13	13	0	1	24	2

Fuente. Software Minitab 15

### 6.15.2 Planeación y programación de la producción de los piñones para experimento DOE (superficie de respuesta)

Para la aplicación del diseño compuesto central (RSM-superficie de respuesta) en el proceso de tratamiento térmico se requiere la siguiente fabricación de piñones en acero, los cuales tienen unas especificaciones que se relacionan en la tabla 12; estas especificaciones están dadas por las 6 variables que fueron descartadas por no tener incidencia sobre la variable de respuesta y las 2 variables que inciden sobre esta; cabe notar que una de las 6 variables fue la que inicialmente se escogió como bloque, la cual se introdujo en el diseño *Full Factorial* ya que estadísticamente incidía sobre la variable de respuesta, pero se descartó en la fase de optimización por no tener incidencia en el modelo planteado.

Tabla 12. Planeación de las muestras para diseño de experimentos full factorial

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL(m)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO
Referencia DOE 1	1(AX)	56	195,3	2	10
Referencia DOE 2	3(BEST)	56	195,3	2	10
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2(RX)</b>	<b>56</b>	<b>195,3</b>	<b>7</b>	<b>10</b>
Referencia DOE 4	0,6	56	195,3	1	10
Referencia DOE 5	3,4	56	195,3	1	10

Fuente. Departamento de planeación y programación de la producción Integrando LTDA.

En total son 13 piñones que se requieren para el experimento; la referencia que aparece resaltada en color rojo hace alusión a los puntos centrales. Estos piñones se programaron como lo muestra la tabla 13, desde el depto. De planeación y programación de la producción de Integrando LTDA., el cual también generó el espacio para la realización del experimento puesto que este tiempo en el cual se realizan las pruebas la línea de producción se encuentra parada, por ende se planea de tal forma que no se afecte significativamente la producción.

Tabla 13. Programación de las muestras para diseño full factorial

REFERENCIA	TIPO AGUJERO DE ALIVIO	DIAMETRO AGUJERO CENTRAL (mm)	DIAMETRO EXTERNO REDONDO DE ACERO	CANTIDAD	DISTANCIA AGUJERO CENTRAL A AGUJERO ALIVIO	OP (ORDEN DE PRODUCCION)	TIEMPO
Referencia DOE 1	1 (AX)	56	195,3	2	10	119MS	0,3 HORA
Referencia DOE 2	3 (BEST)	56	195,3	2	10	120MS	0,3 HORA
<b>Referencia DOE 3</b>	<b>2 (RX)</b>	<b>56</b>	<b>195,3</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	121MA	0,5 HORA
Referencia DOE 4	0,6	56	195,3	1	10	122MS	0,15 HORA
Referencia DOE 5	3,4	56	195,3	1	10	123MS	0,15 HORA

Fuente. Departamento de planeación y programación de la producción Integrando LTDA.

#### 6.15.3 Aplicación del DOE en proceso de tratamiento térmico por inducción

El diseño central compuesto generado por el software Minitab que se muestra en la tabla 14 se aplica al proceso de tratamiento térmico teniendo como variable de respuesta la dureza Rockwell C (HRC); se parametrizan cada una de las variables según los valores que arroja cada corrida y se toma el dato de la dureza como se muestra en la tabla. Adicional se toman los siguientes valores para las variables que no se seleccionaron para el experimento por no incidir sobre la variable de respuesta; estos valores son los que mejor tienen respuesta sobre el modelo según Minitab.

Grados brix = 4,0

Temperatura chiller= 18°C

Presión flauta= 90 PSI

Potencia bobina= 32 Kw

Diámetro externo de piñón= 195,3 mm

Temperatura ambiente= Turno 1 (9:00 a.m. a 12:00 p.m.)

Tabla 14. Listado de corridas con su respectiva dureza luego de aplicación de diseño full factorial en proceso de tratamiento térmico.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtType	Bloques	Tiempo exposición	Tipo A.A.	Dureza
1	1	1	1	20	1	36,5
2	2	1	1	28	1	38
3	3	1	1	20	3	37
4	4	1	1	28	3	39,5
5	5	-1	1	18,34314575	2	35,75
6	6	-1	1	29,65685425	2	38,25
7	7	-1	1	24	0,58578644	37
8	8	-1	1	24	3,41421356	38,5
9	9	0	1	24	2	39,75
10	10	0	1	24	2	40,5
11	11	0	1	24	2	40
12	12	0	1	24	2	39,75
13	13	0	1	24	2	39,5

Fuente. Departamento de calidad de Integrando LTDA.

En la tabla 14 se observan los valores de dureza para cada una de las corridas arrojadas por Minitab; dichas unidades fueron seleccionadas para seguir su proceso o desecho por parte del depto. De calidad de Integrando LTDA., ya que unas cumplían con especificaciones y otras no. No se reportaron novedades y se realizó el experimento en los tiempos mencionados por la variable temperatura ambiente, ya que esta se fijó donde mayor rendimiento se obtuvo según el efecto sobre la variable de respuesta.

#### 6.15.4 ANALISIS ESTADISTICO DEL EXPERIMENTO DOE EN PROCESO DE TRATAMIENTO TERMICO POR INDUCCION (SUPERFICIE DE RESPUESTA)

A continuación diseño central compuesto del modelo planteado para la fase de optimización de la variable de respuesta *DUREZA*.

##### **Diseño central compuesto**

Factores: 2 Réplicas: 1  
Corridas base: 13 Total de corridas: 13  
Bloques base: 1 Total de bloques: 1

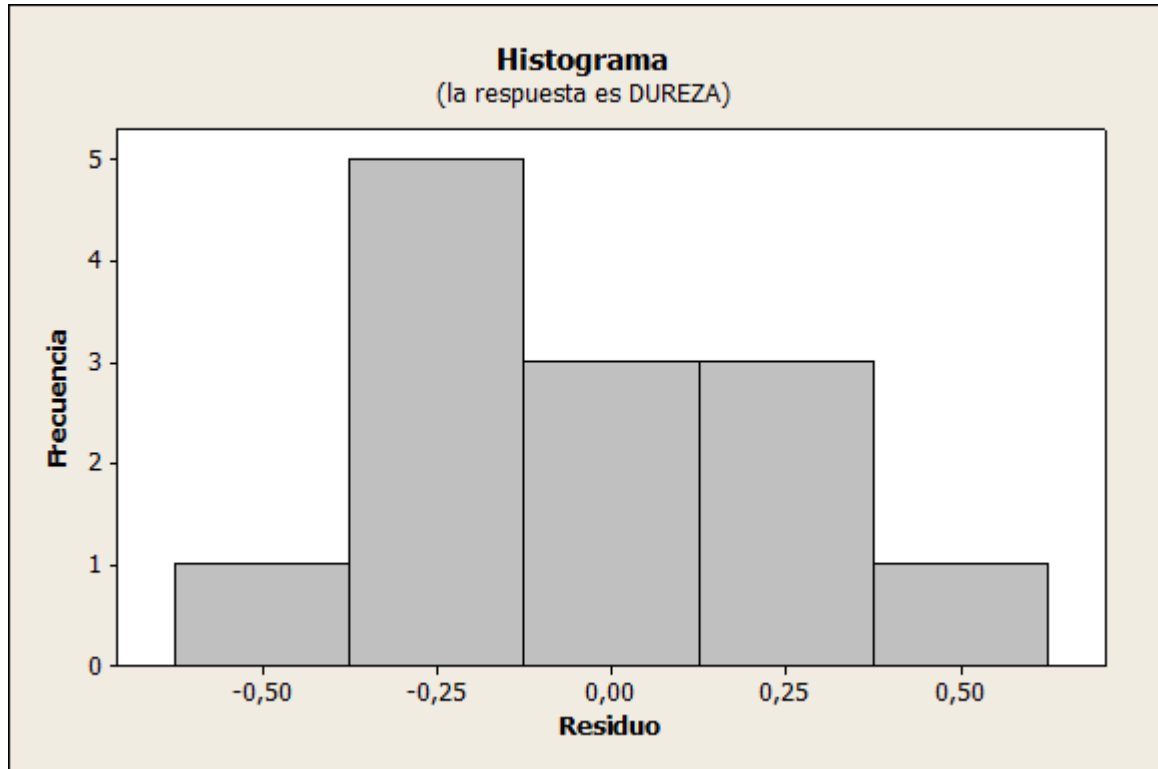
Factorial de dos niveles: Factorial completo

Puntos del cubo: 4  
Puntos centrales en el cubo: 5  
Puntos axiales: 4  
Puntos centrales en axial: 0

Alfa: 1,41421

#### 6.15.4.1 Análisis de histograma de residuos en superficie de respuesta para *DUREZA ROCKWELL C (HRC)*

Figura 53. Grafica de normalidad para diseño central compuesto



Fuente. Software Minitab 15

En la figura 53 se observa el comportamiento de los residuos para la variable de respuesta *DUREZA*, los cuales gráficamente siguen una distribución normal en forma de campana. Esto deja de evidenciar que a pesar de que en el modelo existe curvatura la tendencia de los valores residuales es una distribución normal. Cabe notar que la campana se encuentra un poco corrida hacia la izquierda, presentándose así un leve sesgo como lo muestra el análisis gráfico.

#### 6.15.4.2 ANOVA para efectos principales e interacciones en superficie de respuesta para la *DUREZA ROCKWELL C*

En el siguiente análisis de resultados se presenta el análisis DE LA VARIANZA CON UN FACTOR (ANOVA) que permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de dos o más poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que una población difiere de la otra.

#### **Regresión de superficie de respuesta: DUREZA vs. Tiempo exposición. Tipo A.A.**

El análisis se realizó utilizando unidades codificadas.

Coeficientes de regresión estimados de DUREZA

Término	Coef	SE Coef	T	P
Constante	39,9000	0,1590	250,912	0,000
Tiempo exposición	0,9419	0,1257	7,493	0,000
Tipo A.A.	0,5152	0,1257	4,098	0,005
Tiempo exposición*Tiempo exposición	-1,3563	0,1348	-10,060	0,000
Tipo A.A.*Tipo A.A.	-0,9813	0,1348	-7,278	0,000
Tiempo exposición*Tipo A.A.	0,2500	0,1778	1,406	0,202

S = 0,355579 PRESS = 3,10328

R-cuad. = 96,81% R-cuad.(pred.) = 88,81% R-cuad.(ajustado) = 94,53%

El modelo presenta un  $R^2(ajustado)$  de 94,53%, este hace alusión al coeficiente de determinación, que significa que el modelo que tiene variable de respuesta la dureza esta explicado en dicho porcentaje por los factores y sus efectos sobre esta, así como las interacciones entre factores. Por consiguiente es un porcentaje el cual es confiable y permite obtener información significativa para la toma de decisiones sobre el proceso.



Según ANOVA los efectos principales que tienen incidencia sobre la variable de respuesta son:

- El tiempo de exposición con un  $P < 0,05$
- Tipo de agujero de alivio con un  $P < 0,05$
- La interacción tiempo exposición\*tiempo exposición con un  $P < 0,05$
- La interacción tipo A.A.\*tipo A.A. con un  $P < 0,05$

Esto debido a que el valor  $P$ , que permite estadísticamente determinar si cada factor e interacción incide sobre la variable de respuesta es para cada una de las anteriores  $P < 0,05$  lo que se concluye que tiene gran significancia sobre la variable de respuesta *DUREZA ROCKWEL C*. Para el caso de los demás efectos e interacciones se concluye que no tienen incidencia en el modelo, ya que no son significativas para la variable de respuesta soportado por el valor  $P$  el cual es  $P > 0,05$  que se evidencia en la tabla de resultados. Adicional a que la ANOVA compara la variación entre los niveles y dentro de un nivel dado como lo muestra el análisis de resultados arrojado por Minitab; esto permite tener un panorama más claro de la variación que se presenta por el efecto e interacción de las diferentes variables.

#### 6.15.4.2.1 Análisis de varianza de DUREZA

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regresión	5	26,8457	26,8457	5,3691	42,47	0,000
Lineal	2	9,2212	9,2212	4,6106	36,47	0,000
cuadrado	2	17,3745	17,3745	8,6873	68,71	0,000
Interacción	1	0,2500	0,2500	0,2500	1,98	0,202
Error residual	7	0,8851	0,8851	0,1264		
Falta de ajuste	3	0,3101	0,3101	0,1034	0,72	0,591
Error puro	4	0,5750	0,5750	0,1438		
Total	12	27,7308				

Se evidencia que existe curvatura en el modelo planteado ya que tiene un valor  $P < 0,05$ , además de que el modelo es de segundo orden, es decir, que la curvatura ocasiona que se realicen experimentos los cuales se llevan a cabo de manera secuencial a lo largo de la ruta de ascenso más empinado hasta que no haya aumento en la respuesta, es allí donde se llega al óptimo. El análisis de la varianza también permite concluir que el modelo está representado por una regresión lineal y cuadrática ya que presentan un valor  $P < 0,05$ , es decir, que

estadísticamente el modelo para ciertas características tiene un comportamiento lineal, sigue en el tiempo una línea recta; mientras que para otras tiene un comportamiento cuadrático, sigue una parábola.

#### 6.15.5 Coeficientes del modelo central compuesto (superficie de respuesta)

A continuación cada coeficiente para cada efecto e interacción generada en el modelo y que hace parte de la ecuación que permite obtener el mejor rendimiento sobre la variable de respuesta *DUREZA*.

Coeficientes de regresión estimados de DUREZA utilizando datos en unidades sin codificar

Término	Coef
Constante	-16,5320
Tiempo exposición	4,17924
Tipo A.A.	2,94017
Tiempo exposición*Tiempo exposición	-0,0847656
Tipo A.A.*Tipo A.A.	-0,981250
Tiempo exposición*Tipo A.A.	0,0625000

La ecuación descodificada que representa el modelo full factorial es la siguiente:

$$DUREZA = 39,9000 + 0,9419(tiempo\ exposicion) + 0,5152(tipo\ agujero\ alivio) - 1,3563(tiempo\ exposicion)^2 - 0,9813(tipo\ agujero\ de\ alivio)^2$$

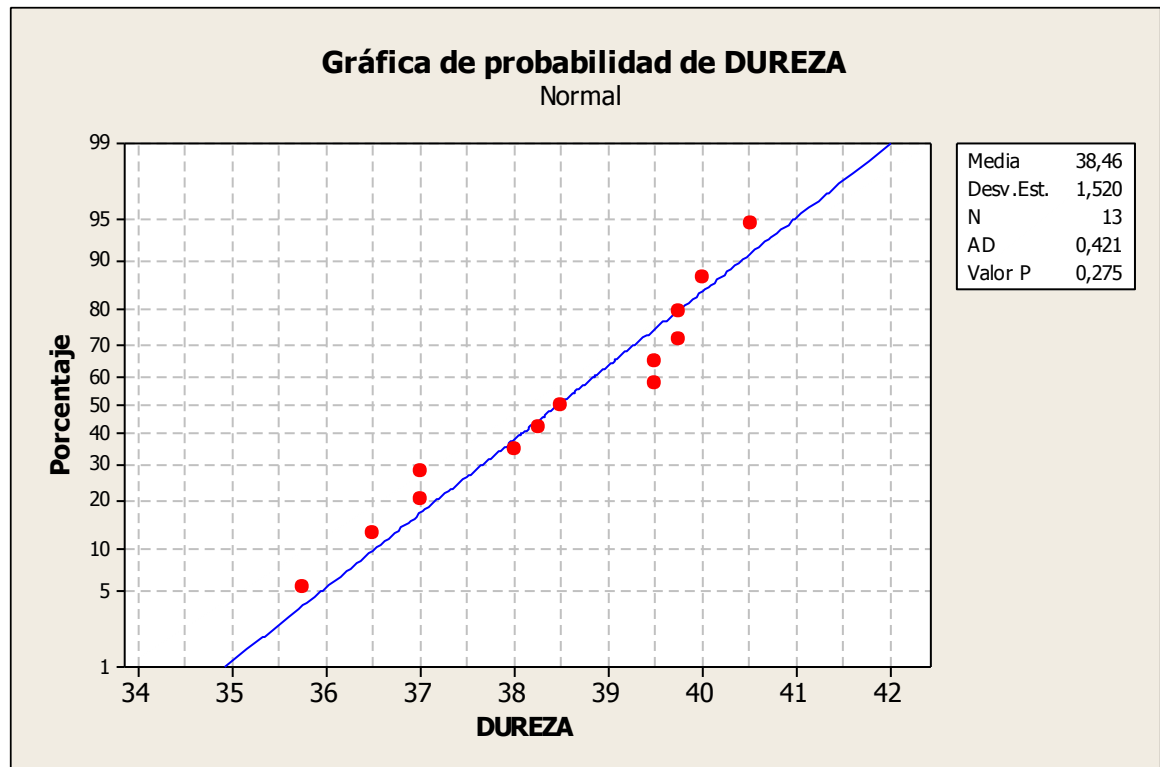
Esta ecuación permite tener el mejor rendimiento para la dureza, la cual es la variable de respuesta y permite estimar los valores más significativos para las variables incidentes en el modelo.

### 6.15.6 Análisis de residuales del DOE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Los residuales son la variación que no está explicada en los modelos de regresión, por lo tanto los residuales pueden ser entendidos como los valores del error observado en cada medición. Los análisis de residuales pueden ser una herramienta efectiva para descubrir diferentes deficiencias que pueden tener el modelo y su impacto sobre la variabilidad.

#### 6.15.6.1 Probabilidad normal de los residuales

Figura 54. Gráfica de probabilidad de DUREZA en diseño central compuesto



Fuente. Software Minitab 15

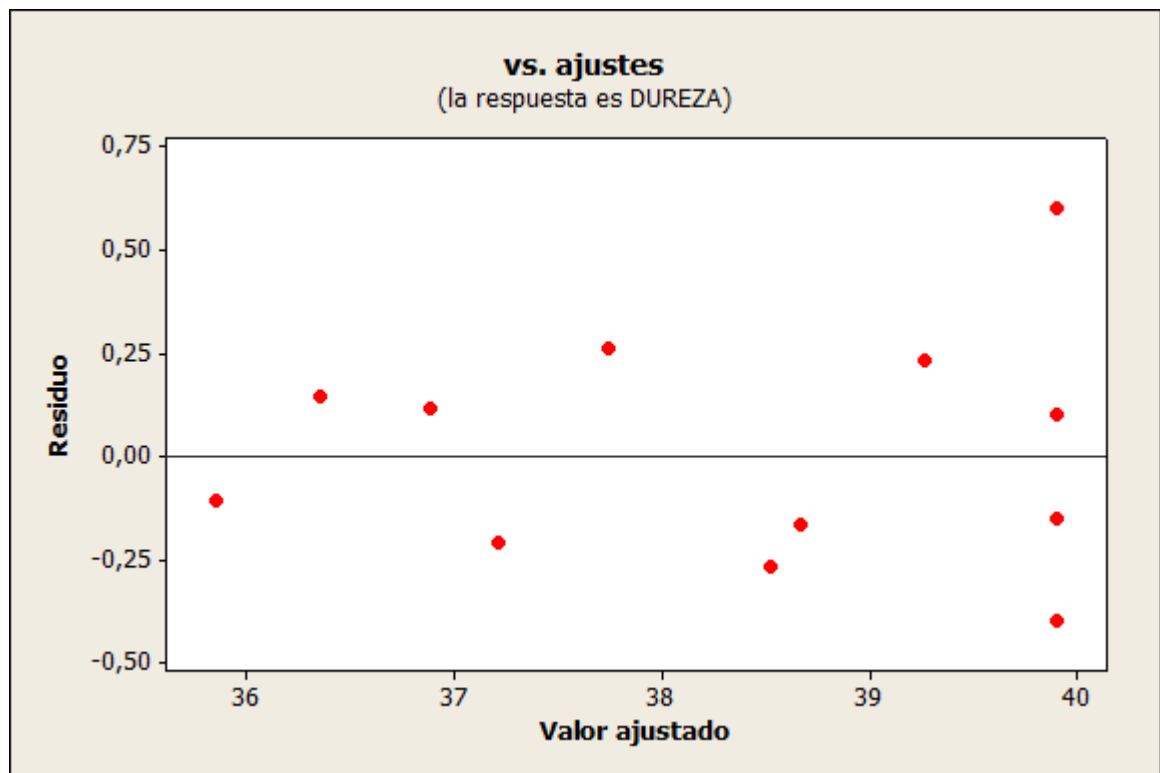
La figura 54 permite evidenciar que la desviación de los datos del modelo sigue una distribución normal puesto que la forma que toman los datos es de una campana, por consiguiente gráficamente se determina que estos cumplen con criterios de normalidad. Adicional a esto se soporta con que los datos siguen una

línea recta confirmando así que los datos son normales y que no existen grupos estadísticos que afecten el modelo, por lo tanto las variables y rangos están constituidos de tal manera que se genera información relevante para estimar un comportamiento del proceso de tratamiento térmico sobre la variable de respuesta dureza.

#### 6.15.6.2 Residuales vs. Cada “valor de dureza” ajustado

Este análisis se utiliza para determinar si existen deficiencias en un modelo determinado; esto teniendo en cuenta la varianza ya que se da la relación entre factores y variable para observar la correlación que existe.

Figura 55. Grafica de residuales vs. Valor de dureza en diseño central compuesto



Fuente. Software Minitab 15

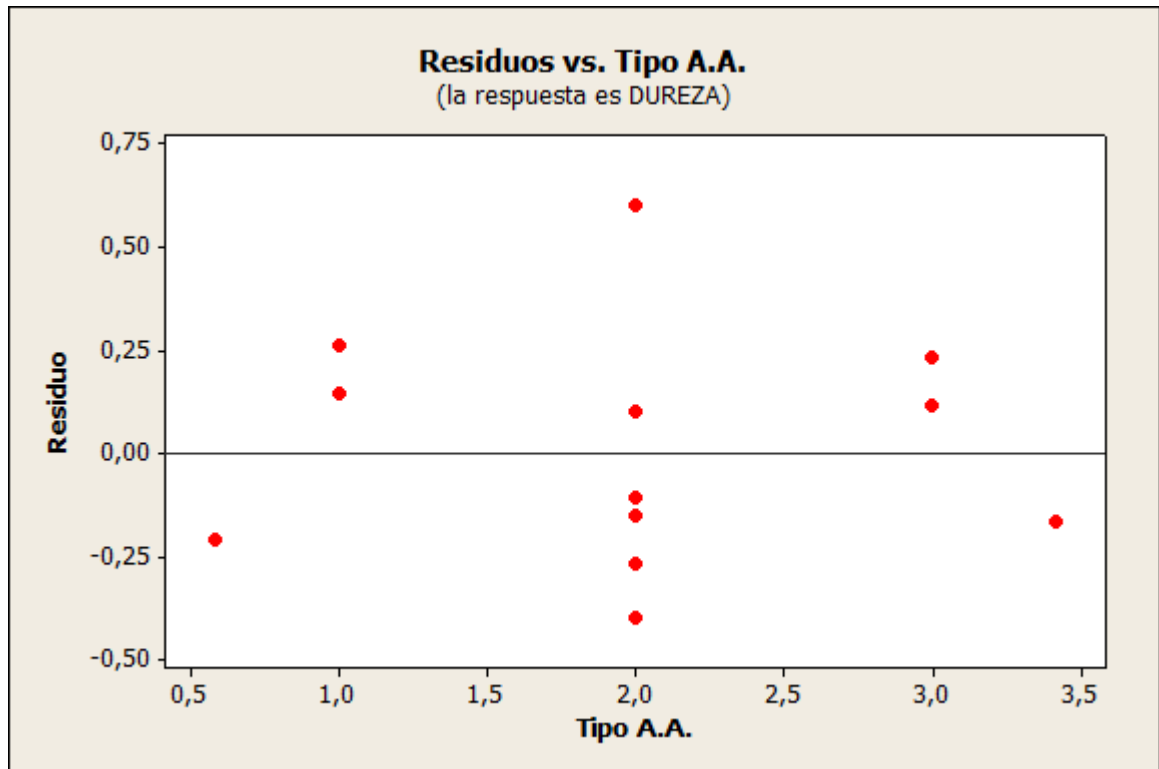
La figura 55 se evidencia que existe variación en la varianza ya que se incrementa en función de la variable de respuesta *DUREZA*. Sin embargo también se observa que la varianza es mayor en los extremos por ende la correlación significativa que

existe entre los factores, niveles, rangos y la variable de respuesta. Por consiguiente se determina que no existen deficiencias en el modelo puesto que gráficamente se concluye que la varianza es constante y que en el tiempo no cambiara el comportamiento de esta.

#### 6.15.6.3 Residuales vs. Cada predictor “factores seleccionados”

##### 6.15.6.3.1 Residuos vs. Tipo agujero de alivio

Figura 56. Grafica de residuales vs. Variable tipo de agujero de alivio en diseño central compuesto



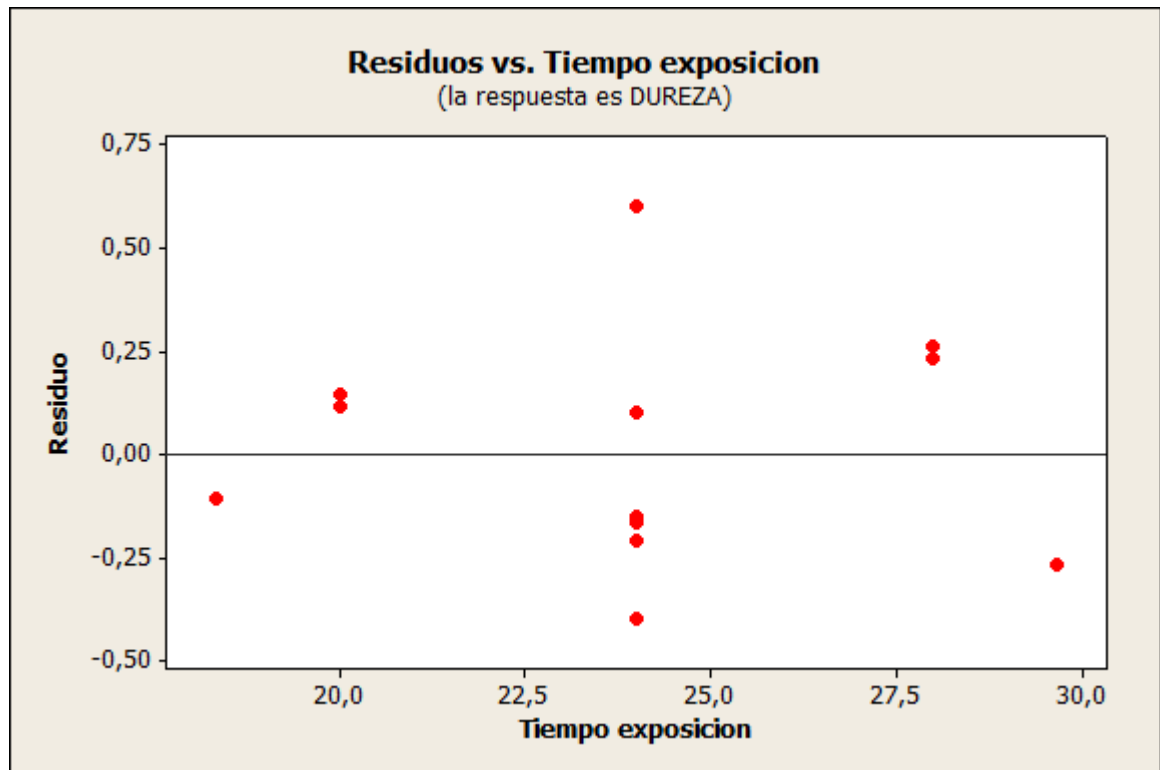
Fuente. Software Minitab 15

La figura 56 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; por consiguiente existe un modelo cuadrático, adicional a esto se evidencia que los datos de dureza están concentrados en el centro de la gráfica lo que deduce que el mejor desempeño se encuentra en esta zona, además que la

variación está dada por los efectos y la interacción de estos con la variable de respuesta.

#### 6.15.6.3.2 Residuos vs. Tiempo de exposición

Figura 57. Grafica de residuales vs. Tiempo de exposición en diseño central compuesto



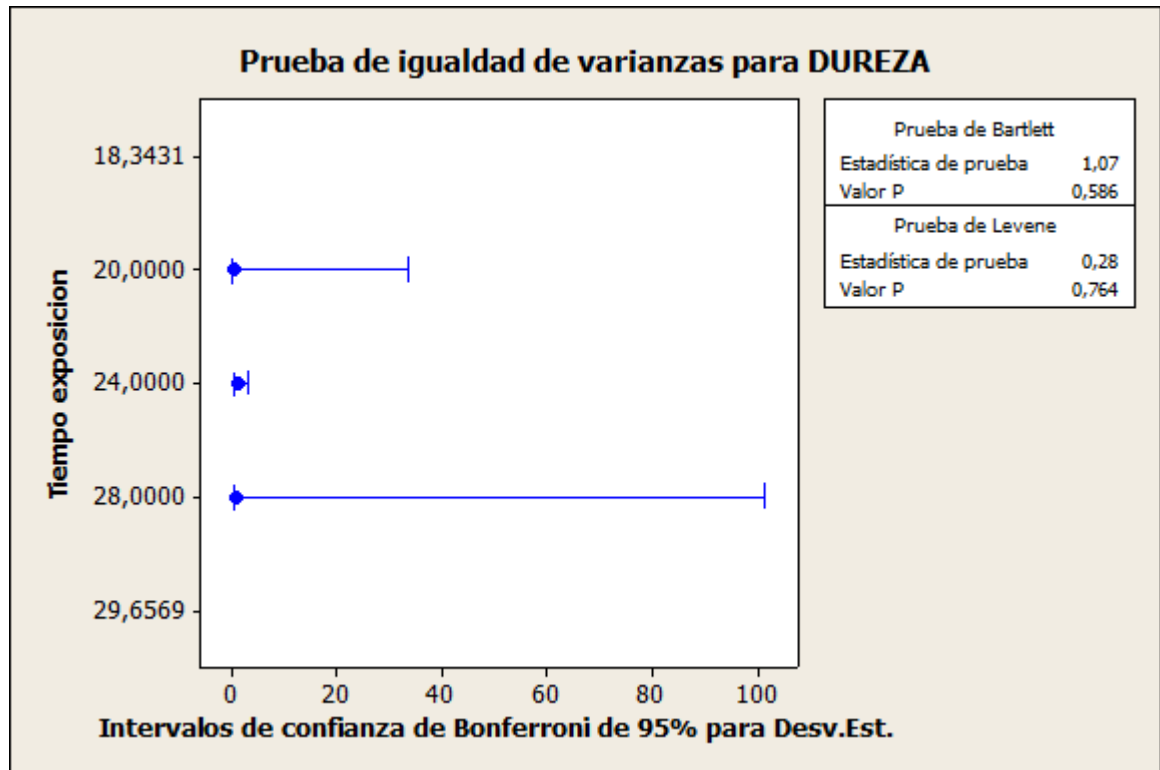
Fuente. Software Minitab 15

La figura 57 permite evidenciar y confirmar la existencia de curvatura en el modelo; adicional a esto se evidencia que los datos de dureza están concentrados en la parte central de la gráfica lo que deduce que el mejor desempeño se encuentra en esta zona, además que la variación está dada por los efectos y la interacción de estos con la variable de respuesta.

### 6.15.6.3.3 Comprobación estadística de varianzas iguales en diseño central compuesto

Factor tiempo de exposición

Figura 58. Prueba de igual de varianzas de tiempo de exposición para DUREZA



Fuente. Software Minitab 15

### Prueba de varianzas iguales: DUREZA vs. Tiempo exposición

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándares

Tiempo				
Exposición	N	Inferior	Desv.Est.	Superior
18,3431	1	*	*	*
20	2	0,134010	0,35355	33,851
24	7	0,693360	1,17640	3,192
28	2	0,402031	1,06066	101,552
29,6569	1	*	*	*

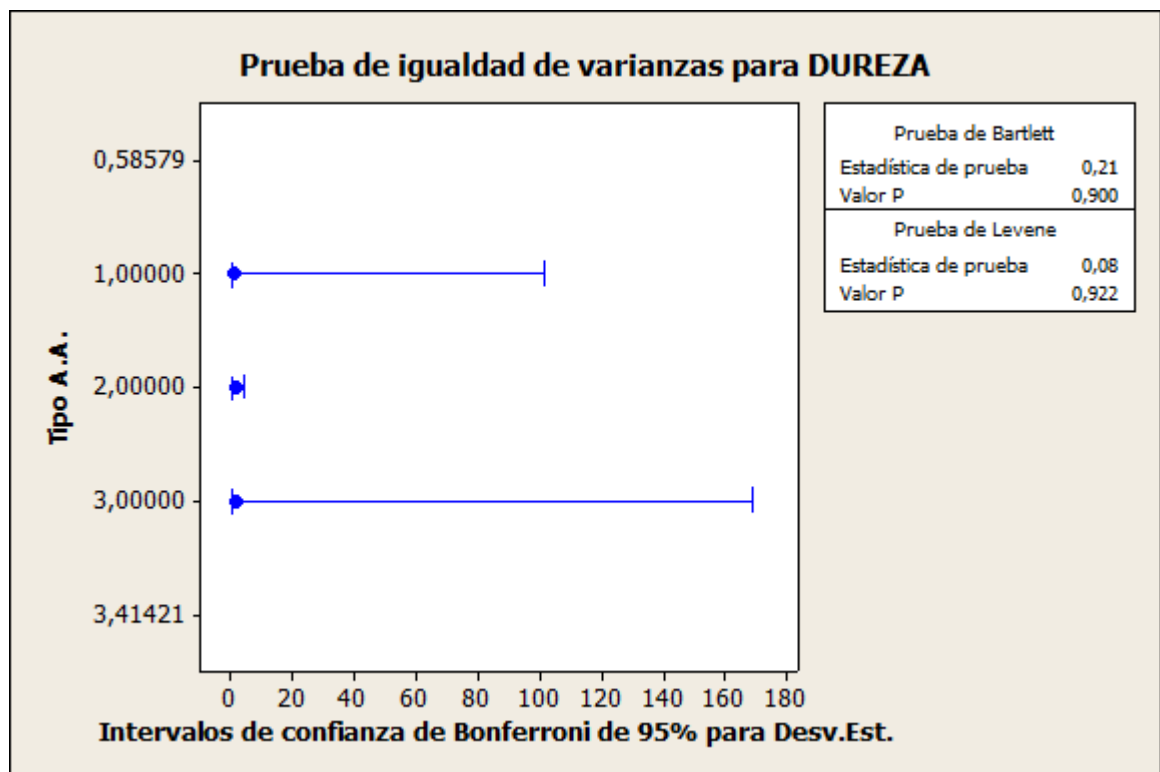
Prueba de Bartlett (distribución normal)  
Estadística de prueba = 1,07. Valor p = 0,586

Prueba de Levene (cualquier distribución continua)  
Estadística de prueba = 0,28. Valor p = 0,764

Existe homogeneidad de las varianzas, es decir, aún cuando los valores de error estadístico difieren entre sí, el procedimiento señala que es un efecto aleatorio y existe gran probabilidad de que la fuente o fuentes de variación sean las mismas.

Factor tipo Agujero de alivio

Figura 59. Prueba de igual de varianzas de tipo A.A. para DUREZA



Fuente. Software Minitab 15



### Prueba de varianzas iguales: DUREZA vs. Tipo A.A.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándares

Tipo A.A.	N	Inferior	Desv.Est.	Superior
0,585786	1	*	*	*
1	2	0,402031	1,06066	101,552
2	7	0,953836	1,61835	4,391
3	2	0,670051	1,76777	169,254
3,41421	1	*	*	*

Prueba de Bartlett (distribución normal)

Estadística de prueba = 0,21. Valor p = 0,900

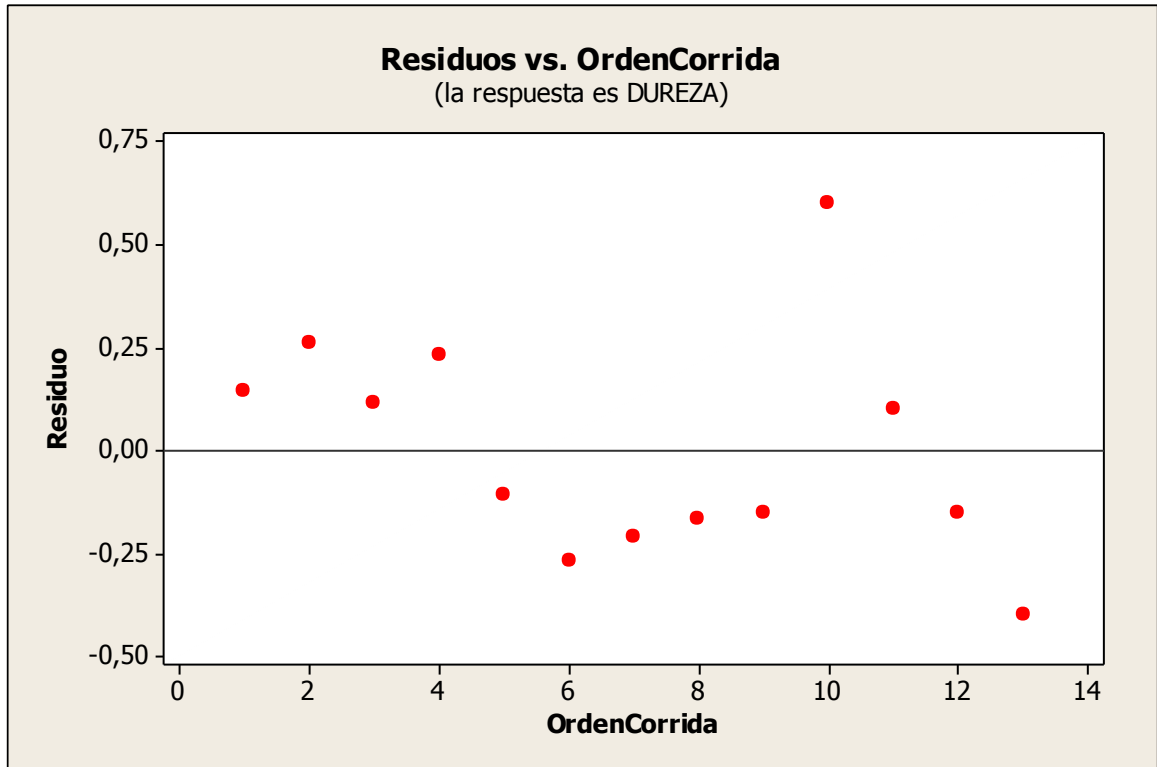
Prueba de Levene (cualquier distribución continua)

Estadística de prueba = 0,08. Valor p = 0,922

Existe homogeneidad de las varianzas, es decir, aún cuando los valores de error estadístico difieren entre sí, el procedimiento señala que es un efecto aleatorio y existe gran probabilidad de que la fuente o fuentes de variación sean las mismas.

#### 6.15.6.4 Independencia de errores

Figura 60. Grafica de residuales vs. Orden de corrida en diseño central compuesto



Fuente. Software Minitab 15

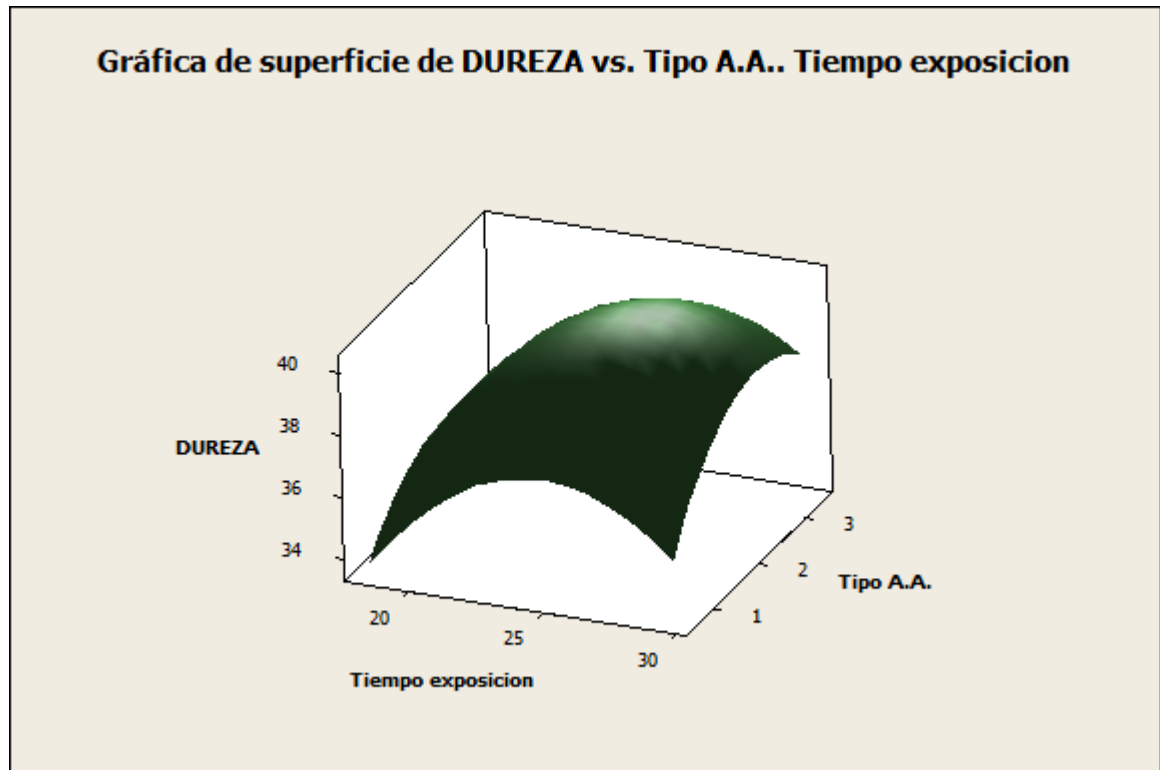
Los datos como lo muestra la figura 60 no tienen una tendencia establecida, ya que se observa una nube de puntos en las diferentes corridas establecidas en el modelo fraccionado de Minitab.

#### 6.15.7 Optimización de modelo de superficie de respuesta para la *DUREZA*

Determinar las condiciones óptimas de operación es clave y fundamental cuando se decide aplicar un DOE a un proceso en específico, ya que por medio de esta metodología es que se pretende encontrar los mejores valores que den respuesta a lo que se pretende optimizar. Por medio de la metodología de superficie de respuesta (RSM) se logra: desarrollar, mejorar y optimizar procesos; diseñar, desarrollar y formular nuevos productos y mejorar el diseño existente de un producto.

Para el caso del modelo planteado a continuación en la figura 61 se observa la representación gráfica 3D de la gráfica de superficie.

Figura 61. Grafica de superficie de DUREZA vs Tipo A. A., Tiempo de exposición

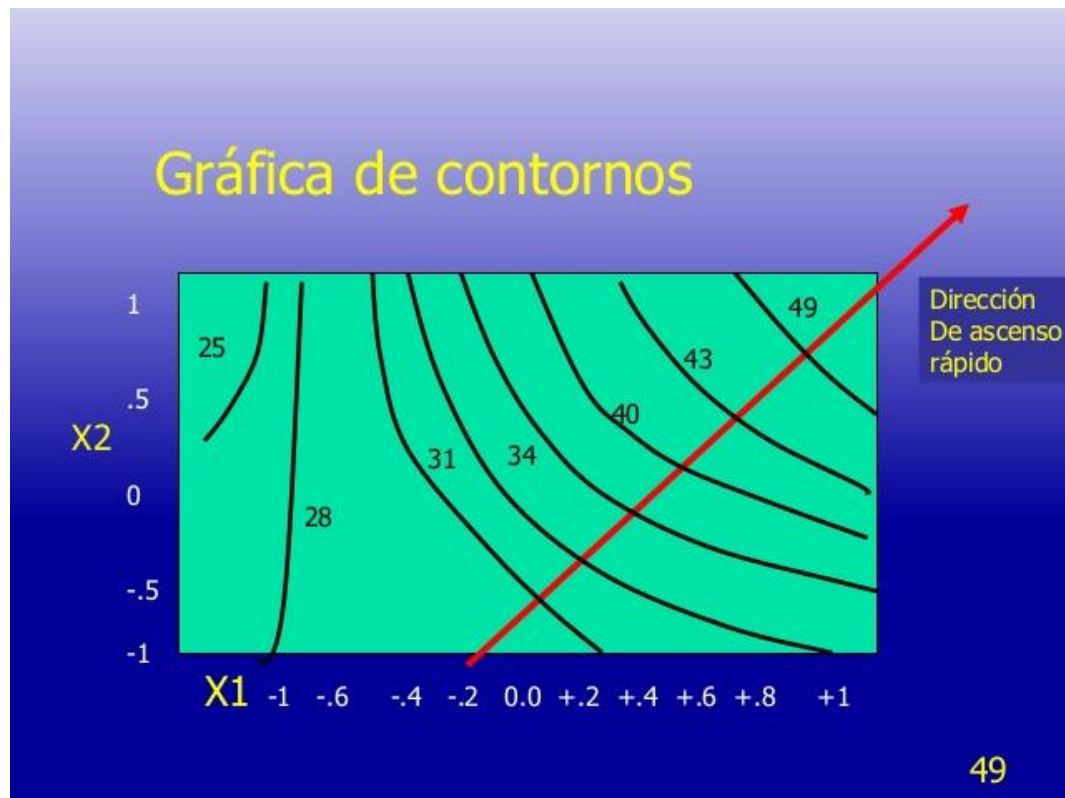


Fuente. Software Minitab 15

En la figura 61 se observa el comportamiento de las variables tiempo de exposición y tipo agujero de alivio con respecto a la variable de respuesta dureza, gráficamente se concluye que los efectos de las variables sobre la respuesta hacen que esta tome una forma redonda, es decir, que la superficie del sólido es cóncava confirmando así la existencia de curvatura en el diseño central compuesto (RSM). Cabe notar que al presentar la gráfica este comportamiento se deduce que la ecuación que presenta el modelo es de segundo orden, por consiguiente se hace necesario seguir la ruta de ascenso empinado rápido para hallar los valores que incrementan la variable de respuesta al valor esperado.

#### 6.15.7.1 Crecimiento de la gráfica de contorno de variable de DUREZA vs. Tipo A.A., tiempo de exposición

Figura 62. Esquema de crecimiento de gráfica de contorno para variable de respuesta DUREZA

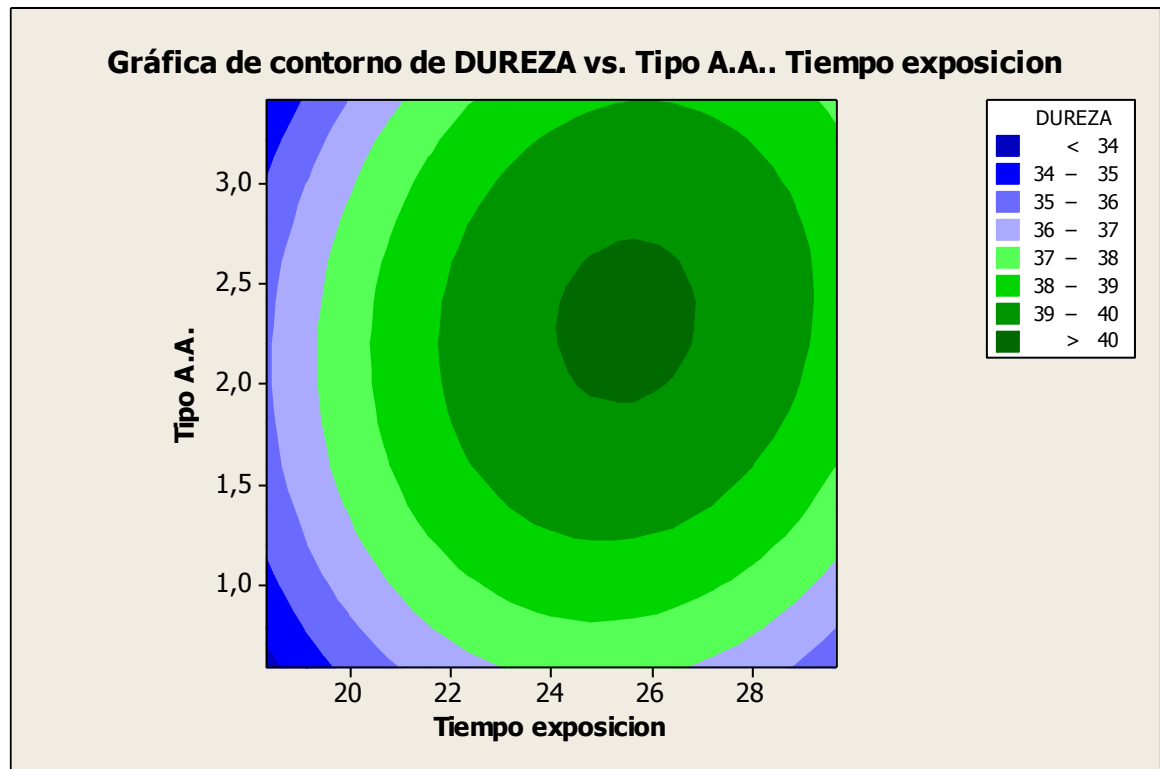


Fuente. Página web <http://es.slideshare.net/fmcelori/diseo-15431154>

En la figura 62 se observa la dirección en la cual la gráfica de contorno se mueve en la búsqueda del óptimo, teniendo en cuenta que como hay curvatura en el modelo el ascenso rápido o ascenso empujado tiene un crecimiento exponencial hasta encontrar la zona óptima que mejor rendimiento tiene sobre a la variable de respuesta DUREZA.

En la figura 63 se muestra la gráfica de contorno superficial para el modelo seleccionado

Figura 63. Grafica de contorno de DUREZA vs. Tipo A.A., Tiempo de exposición



Fuente. Software Minitab 15

En esta figura se evidencia la zona optima arrojada por Minitab, esta zona es la que tiene una tonalidad verde oscura y se encuentra en la mitad rodeada de las otras zonas las cuales están en función del valor de dureza pero que teniendo en cuenta el objetivo de dureza son áreas por fuera de la meta. Los valores comprendidos para la zona óptima son:

Tiempo de exposición= 24 – 27 seg.

Tipo de agujero de alivio= 2 – 2,6

Es aquí donde se evidencian las mejores condiciones de operación que aseguran el mejor rendimiento de la variable de respuesta dureza, por consiguiente y según software Minitab los valores ideales para estas dos variables incidentes son:

### Optimización de respuesta

#### Parámetros

	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importar
DUREZA	Objetivo	35	40	45	1	1

#### Solución global

Tiempo expos = 25,3142

Tipo A.A. = 2,69996

#### Respuestas pronosticadas

DUREZA = 40,0004, conveniencia = 0,999920

Conveniencia compuesta = 0,999920

## 7. CONCLUSIONES

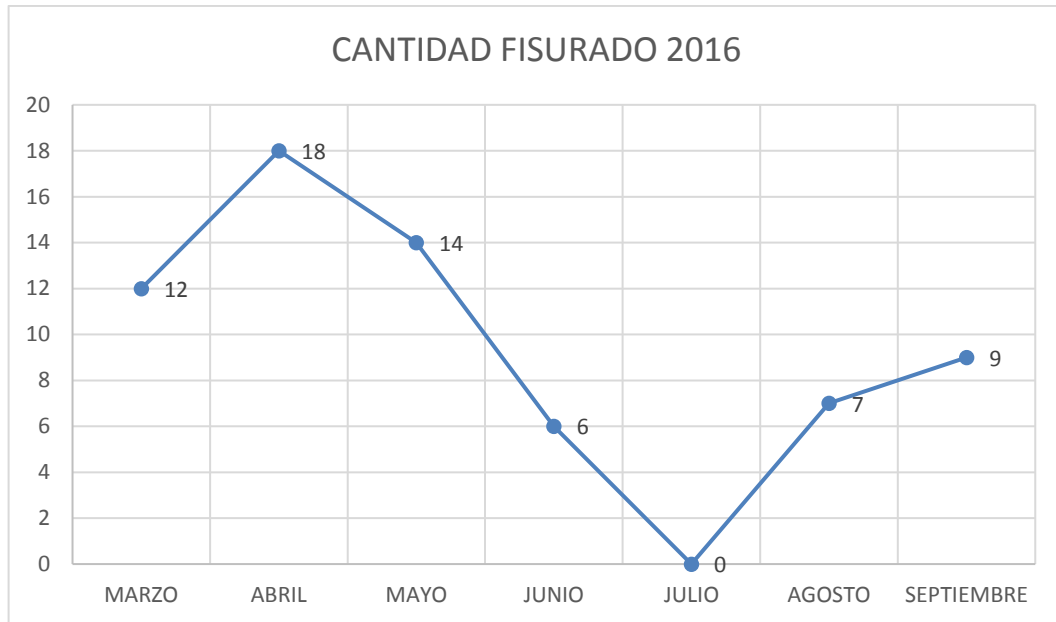
La problemática que se venía presentado en la compañía en cuanto a la fisura del piñón trasero por cristalización del material en proceso de tratamiento térmico en Integrando LTDA., se controló y redujo notablemente, esto debido a que por medio del DOE se logró interactuar y conocer cómo funciona el proceso, que interviene con el y que debe de considerarse como relevante de este. Esto surge por la necesidad que tiene la compañía de ser más competitiva y de reducir notablemente los desperdicios, como lo son reprocesos y desechos en la línea de producción de piñonería y específicamente en la línea de piñón trasero que como lo muestran los datos estadísticos del Depto. De calidad de Integrando LTDA esta línea es la más representativa en cuanto al defecto de fisura y es donde financieramente más dinero se pierde porque el material se cristaliza y el producto no sirve. Luego de la aplicación del DOE se obtuvieron unos parámetros óptimos de trabajo para el proceso de tratamiento térmico que lograron disminuir significativamente el defecto como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Comportamiento de defecto de fisura en línea de producción de piñón trasero año 2016

<b>COMPORTAMIENTO DEFECTO FISURA LINEA DE PIÑON TRASERO AÑO 2016</b>	
<b>MES</b>	<b>CANTIDAD FISURADO 2016</b>
<b>MARZO</b>	12
<b>ABRIL</b>	18
<b>MAYO</b>	14
<b>JUNIO</b>	6
<b>JULIO</b>	0
<b>AGOSTO</b>	7
<b>SEPTIEMBRE</b>	9
<b>TOTAL</b>	<b>66</b>

Fuente. Departamento de calidad Integrando LTDA.

Figura 64. Grafica piñones traseros fisurados en el año 2016



Fuente. Departamento de calidad de Integrando LTDA.

En la tabla 15 se observa la cantidad de unidades malas para el defecto de fisurado en el periodo de marzo a septiembre del año 2016; se muestra mes tras mes las unidades reportadas en el registro interno que lleva el depto. De calidad de Integrando LTDA. En la figura 64 se observa gráficamente el comportamiento de fisurado en los últimos 7 meses del año 2016, donde se ve una tendencia a la baja desde el mes de marzo a mes de septiembre, dado que a partir de ese mes se comenzó a trabajar con los nuevos parámetros encontrados en el análisis del DOE y que podían ser fijados por no tener incidencia sobre la variable de respuesta, los parámetros se seleccionaron teniendo en cuenta donde se obtiene el mejor desempeño de ellos según las estadísticas arrojadas por Minitab.

#### 7.1 Análisis comparativo defecto de fisurado año 2015 y año 2016

A continuación la tabla 16 muestra la cantidad de unidades reportadas en los meses enero a septiembre por defecto de fisurado, según registro suministrado por el depto. De calidad de Integrando LTDA.

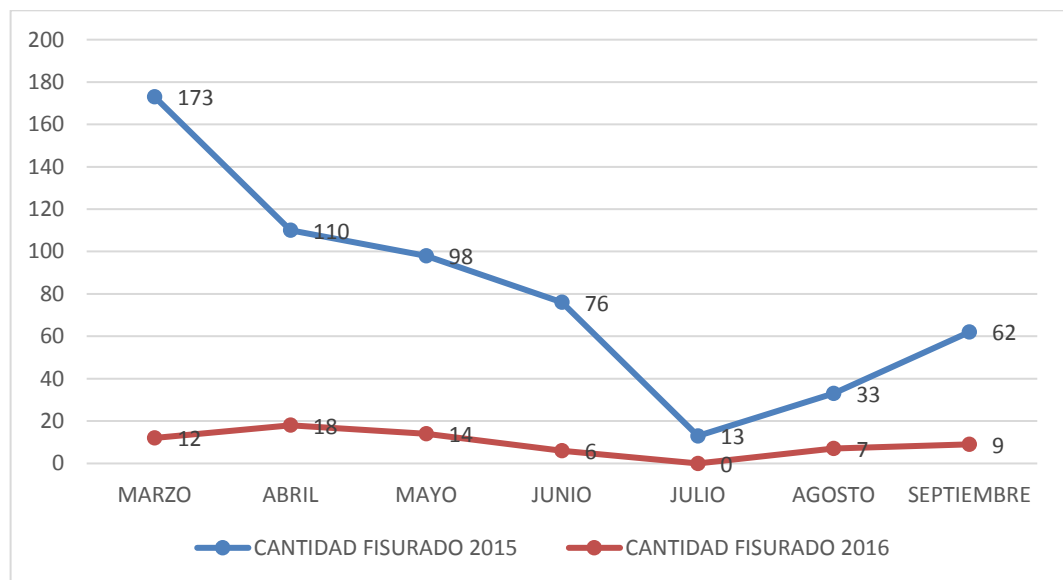


Tabla 16. Análisis comparativo entre año 2015 y 2016 de defecto de fisura en línea de producción de piñón trasero

<b>COMPORTAMIENTO DEFECTO FISURA LINEA DE PIÑÓN TRASERO AÑO</b>		
<b>MES</b>	<b>CANTIDAD FISURADO 2015</b>	<b>CANTIDAD FISURADO 2016</b>
<b>MARZO</b>	173	12
<b>ABRIL</b>	110	18
<b>MAYO</b>	98	14
<b>JUNIO</b>	76	6
<b>JULIO</b>	13	0
<b>AGOSTO</b>	33	7
<b>SEPTIEMBRE</b>	62	9
<b>TOTAL</b>	<b>565</b>	<b>66</b>

Fuente. Departamento de calidad de Integrando LTDA.

Figura 65. Grafica de análisis comparativo de fisura año 2015 y 2016



Fuente. Departamento de calidad de Integrando LTDA.

En la figura 65 deja evidenciar que el año 2015 con respecto al año 2016 disminuyó notoriamente el defecto de fisurado, esto se puede observar mes tras mes durante el primer semestre del año en curso. A partir del mes de abril se comenzó a trabajar con los parámetros arrojados por el análisis del DOE, donde se observa claramente como ha mejorado el proceso logrando así disminuir notoriamente la cantidad de unidades reportadas en el proceso de tratamiento térmico por fisurado e impactando uno de los objetivos esperados por la compañía como lo es el mejoramiento, estabilidad de los procesos productivos así como la disminución de desperdicios como lo son los desechos.

En el periodo de marzo a septiembre del año 2015 se reportaron 565 unidades por defecto de fisurado mientras que en el mismo periodo año 2016 se reportaron solo 66 unidades defectuosas por fisurado, un 11,68% del total reportado en el año 2015, lo cual deja evidenciar que las acciones tomadas en este proceso repercutieron de tal forma que se disminuyó significativamente el problema de calidad que se venía reportando en el proceso de tratamiento térmico por inducción. En total se reporta una mejora de 88,32% del año 2016 con respecto al año 2015 del defecto de fisurado, es decir, que este defecto paso de ser uno de los más representativos para el depto. De calidad de Integrando LTDA., a ser un defecto de bajo impacto según estadísticas. Esto deja evidenciar que los esfuerzos deben ser enfocados en otros defectos representativos según los datos estadísticos del dpto. De calidad ya que el fisurado dejo de pertenecer al 80% de los problemas de calidad de la compañía.

El costo promedio de un piñón trasero en acero es de (\$18946 COP), teniendo en cuenta que para el primer semestre año 2015 en total fueron 565 unidades defectuosas por fisurado, las perdidas en dinero para la compañía en el periodo marzo a septiembre fue de \$10'704.490 COP mientras que para el año 2016 en total son 66 unidades reportadas con defecto de fisurado que suman \$1'250.436 COP, lo que deja evidenciar un ahorro de \$9'454.054 COP, con un 88,32% del total reportado en 2015. Esto confirma que las acciones tomadas después del análisis del DOE generaron un impacto bastante representativo para la compañía, tanto así, que como acción de mejora para la línea de piñón delantero se pretende realizar el mismo análisis por medio de un DOE del proceso de temple en dicha línea. Cabe notar que para las directivas de la compañía estas acciones son muy importantes ya que están encaminadas a impactar los objetivos estratégicos como son la reducción de costos y que finalmente apunta a que Integrando LTDA., sea más competitiva en el mercado de moto partes.

El análisis del DOE permitió la optimización del proceso de tratamiento térmico llevando este a unos parámetros ideales de operación que garantizan el grado de dureza deseado según especificaciones del cliente, satisfaciendo así las necesidades de este y del mercado de piñones a nivel nacional e internacional cumpliendo con los estándares que rigen para esta clase de producto.

El análisis del DOE deja evidenciar que el proceso de tratamiento térmico en Integrando LTDA., es un proceso el cual no se tiene claridad cómo funciona, como opera este y que variables intervienen en este para que el piñón logre la dureza deseada según especificaciones del cliente. Además se evidencia la falta de interacción con este, puesto que en la compañía nunca se ha realizado una fase experimental con el proceso, que permita conocerlo y entenderlo y así poder lograr obtener información relevante que ayude a tomar decisiones sobre este estabilizándolo y llevándolo a los parámetros deseados según la capacidad del proceso y requerimientos del cliente.

El DOE es una herramienta muy útil para desarrollar, mejorar y optimizar procesos, además para diseñar, desarrollar y formular nuevos productos. También es una herramienta que se utiliza cuando se desea mejorar el diseño de un producto existente. Por medio de RSM (superficie de respuesta) se busca llegar al óptimo en una o más respuestas; RSM es un proceso de iteraciones secuencial para llegar rápidamente hacia el óptimo deseado y que mejor rendimiento tenga sobre la variable de respuesta.

Cuando el conocimiento del proceso es bajo que suelen tener muchas posibles factores a considerar. Estamos interesados principalmente en que los factores y las interacciones de bajo orden son importantes para que podamos eliminar los factores insignificantes de experimentación. Los experimentos que se ejecutan bajo estas circunstancias se llaman experimentos de detección.

## 8. RECOMENDACIONES

El DOE es una herramienta muy útil para estabilizar, mejorar y optimizar procesos, por consiguiente es recomendable realizar el mismo diseño experimental para el proceso de tratamiento térmico de la línea de producción de piñones delanteros en acero, ya que estadísticamente el proceso muestra unos datos altos de desecho y problemas de operación que finalmente recaen en pérdidas económicas para la compañía.

Se requiere abrir espacios para la experimentación y el análisis de los procesos buscando agilidad, flexibilidad y tiempos de setup bajos, así como disminución de desperdicios llevando a la compañía a ser más competitiva e internamente alcanzar los objetivos estratégicos planteados desde la gerencia de Integrando LTDA.

Las herramientas lean son de bastante importancia dado que las compañías al adoptarlas se vuelven más atractivas para el mercado, por su competitividad, calidad, oportunidad, flexibilidad y la poca variabilidad que se presenta de los procesos, dejando como consigna la estabilidad y el control estadístico que se lleva al detalle de cada uno y que permite tomar rápidamente acciones encaminadas a corregir el problema que se está generando.

La interacción hombre-máquina arroja información suficiente y veraz que permite tomar decisiones objetivas y lograr mejores resultados encaminados a tener el proceso bajo control estadístico y dentro de los parámetros exigidos por el cliente.

La industria Colombiana no está muy familiarizada con las herramientas de mejoramiento continuo, esto debido a que para muchas empresas es muy costoso generar estos espacios y poco el impacto que tiene, sin embargo, empresas de talla mundial han demostrado que generar estos espacios y propender por adoptar políticas de mejoramiento continuo si tienen un impacto muy significativo ya que se puede ofrecer en el mercado servicios y/o productos de mayor calidad, a un precio justo y en las condiciones que lo desea el cliente.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Myers y Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. (Segunda Edición. Limusa Wiley).

Ostle, Bernard. Estadística aplicada. (México: Editorial Limusa-Wiley, S.A, 1973).

González Campos, Maribel. La experimentación científica. <http://es.wikipedia.org/wiki/experimentaci%C3%B3n.html> (4 sep 2008).

Chen Hong. Christina Yun-ju El método de diseño experimental Taguchi y el método de diseño experimental de Fisher, una comparación.

[http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec2\\_3.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec2_3.html)

[http://www.tratar.com.co/descargas/art\\_tecnico.pdf](http://www.tratar.com.co/descargas/art_tecnico.pdf)

Cochran, W.G. y G.M Cox. Diseños experimentales. (Segunda edición. Nueva York: Wiley, 2000)

Graybill, F.A. (1961), An Introduction to Linear Statistical Models, McGraw-Hill

Montgomery, D.C. and Peck, E. A. (1992), Introduction to Linear Regression Analysis, John Wiley & Sons, New York

Myers. R.H. and Montgomery, D.C. (1995), Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York

Box, G.E.P. and Draper, N.R. (1987), Empirical Model-Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, New York

Cornell, J. A. (1990), Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York

Moen, Ronald D.; Nolan, Thomas W. and Provost, Lloyd P. Quality Improvement Through Planned Experimentation, McGraw-Hill, New York, N.Y.

Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 5<sup>th</sup> Ed.

## 10. WEBGRAFIA

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4471/1/3384791G633P.pdf>

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1138\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1138_Q.pdf)

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1138\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1138_Q.pdf)

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/3069/1/658151Z35.pdf>

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1138\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1138_Q.pdf)

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532015000100019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532015000100019)

[http://www.fbcbl.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/curso\\_TopQuim\\_2013/Bibliografia%20RSM/DE\\_un%20articulo%20interesante.pdf](http://www.fbcbl.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/curso_TopQuim_2013/Bibliografia%20RSM/DE_un%20articulo%20interesante.pdf)

<http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/27-4/13a.pdf>

<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>

<http://www.casadellibro.com/libro-metodologia-seis-sigma-a-traves-de-excel/9788493776978/1841243>

<http://www.trateriber.es/pdf/Grupo%20Trateriber%20-%20Induccion.pdf>